

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

Міністерство освіти і науки України
Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал»,
Державне космічне агентство України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Добровольська Катерина Володимирівна

УДК 621.3

ДИСЕРТАЦІЯ

Підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери
для супутника

05.11.07 – Оптичні прилади та системи

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Колобродов Валентин Георгійович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2017

АНОТАЦІЯ

Добровольська К.В. Підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери для супутника. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.11.07 оптичні прилади та системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2017.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню наукової задачі підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери (МБК) для супутника без введення до приладу додаткових пристроїв шляхом обробки субпіксельно зміщених зображень за рахунок власного руху носія знімальної апаратури.

Теплова аерокосмічна зйомка базується на виявленні теплових аномалій шляхом фіксації теплового випромінювання об'єктів на поверхні Землі в інфрачервоній області спектру. Температурні неоднорідності поверхні Землі виникають в результаті неоднакового нагрівання її різних ділянок. Область застосування даних інфрачервоних знімків дистанційного зондування Землі охоплює такі галузі як пошук корисних копалин та енергоносіїв, оцінка стану поверхневих порід, аналіз урбанізованих та промислових територій, оцінка екологічного стану лісів, оцінка запасів лісів, моніторинг надзвичайних ситуацій: спостереження за лісовими пожежами, вулканами, забрудненням нафтопродуктами, прогнозування природних та техногенних катастроф, моніторинг водних ресурсів, визначення температури земної поверхні та хмар, вивчення хмарного покриву, аналіз та прогнозування кліматичних змін, оцінка стану ґрунтів тощо.

В першому розділі на основі аналізу областей застосування та призначення космічних МБК виявлено основні задачі ІЧ камер, які лежать в області метеорології, забезпечення контролю температури поверхні Землі та

водних поверхонь, а також моніторингу пожеж і вулканів. Для забезпечення розв'язання поставлених задач отримані ІЧ знімки піддаються складній багаторівневій та багатоплановій цифровій обробці, яка є причиною висування жорстких вимог до зображень, а, відповідно, і до технічних параметрів камер. Визначено первинні та найважливіші параметри ефективності інфрачервоних камер космічного базування, які використовуються виробниками для оцінювання роботи ІЧ камер, а саме просторову та енергетичну роздільну здатність. На основі порівняльного аналізу існуючих МБК, їх основних технічних параметрів і характеристик виявлено актуальність проблеми підвищення просторової роздільної здатності, оскільки роздільна здатність існуючих ІЧ камер не відповідає значенням, необхідним для рішення багатьох задач ДЗЗ.

Розглянуто існуючі методи підвищення роздільної здатності зображень. Серед них методи на основі мікросканування дозволяють додавати в результуюче зображення високої роздільної здатності більше корисної інформації. Приведено основні методи відновлення зображень з високою роздільною здатністю з використанням субпіксельно зміщених зображень нижчої роздільної здатності при субпіксельній обробці.

В другому розділі досліджено удосконалену математичну модель МБК із врахуванням параметрів об'єкту, фону, оптичної системи та приймача випромінювання, електронного блоку обробки і передачі сигналу, на основі якої розраховані основні узагальнені характеристики МБК, які є критеріями для оцінки просторової та енергетичної роздільної здатності. Визначено можливі шляхи покращення просторової та енергетичної роздільної здатності МБК.

Третій розділ присвячено теоретичному дослідженню впливу процесу підвищення просторової роздільної здатності камери шляхом реєстрації субпіксельно зміщених за рахунок власного руху супутника зображень на ефективність аерокосмічної зйомки.

Розглянуто існуючі методи субпіксельної реєстрації зображень. Запропоновано технологію субпіксельної реєстрації зображень для підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери за рахунок власного руху супутника та повороту матричного приймача випромінювання відносно орбітального руху без конструктивних ускладнень. Розроблена універсальна математична модель запропонованої технології субпіксельної реєстрації зображень для забезпечення підвищення просторової роздільної здатності камери, яка дозволяє оцінювати ефективність роботи МБК та підвищення їх просторової та енергетичної роздільної здатності внаслідок застосування субпіксельної реєстрації зображень на етапі проектування.

На основі розробленої математичної моделі процесу субпіксельної реєстрації зображень створено програмне забезпечення, яке дозволяє проаналізувати велику кількість режимів субпіксельної реєстрації та вибрати параметри оптимального режиму субпіксельної реєстрації зображень, що забезпечують мінімальні значення похибок реєстрації і максимальну ефективність підвищення просторової роздільної здатності камери для різних умов зйомки. При розробці моделі враховувались основні параметри приймачів з діапазоном можливого регулювання, можливість зміни висоти орбіти, можливість зйомки на різних ділянках орбіти, вплив обертання Землі тощо. Крім того передбачено застосування режиму субпіксельної обробки тільки деяких з отриманих кадрів. Критерієм вибору режиму зйомки обрано значення похибок зміщення кадрів, основним джерелом яких є відхилення висоти орбіти від номінального значення та зміни широти місцевості, що знімається.

Приведено математичну модель субпіксельної обробки зображень в мікроболометричній камері. Досліджено вплив субпіксельної реєстрації зображень з наступною субпіксельною обробкою на енергетичну роздільну здатність камери та побудована математична модель камери із врахуванням

цього впливу. Розглянуто основні критерії ефективності субпіксельної обробки зображень.

Вказано шляхи підвищення ефективності субпіксельної реєстрації зображень. Визначено вплив процесу реєстрації субпіксельно зміщених за рахунок власного руху супутника зображень на просторову та енергетичну роздільну здатність МБК.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням впливу процесу підвищення просторової роздільної здатності камери шляхом реєстрації субпіксельно зміщених за рахунок власного руху супутника зображень на ефективність аерокосмічної зйомки. Розглянуто стендове обладнання для вимірювання основних характеристик мікроболометричних камер та дослідження впливу застосування субпіксельної реєстрації зображень на основні характеристики камери. Приведено основні методики проведення експериментальних досліджень. Показано, що результати експериментальних досліджень підтвердили отримані результати теоретичних досліджень підвищення просторової роздільної здатності камери шляхом реєстрації субпіксельно зміщених зображень. Визначено, що відбувається підвищення просторової роздільної здатності МБК на очікуваному в результаті математичного моделювання рівні, тобто в середньому в 1.4 рази. Розраховано відповідні значення кроку точок зображення на поверхні Землі із застосуванням та без застосування запропонованої технології підвищення просторової роздільної здатності.

Ключові слова: мікроболометрична камера, просторова роздільна здатність, енергетична роздільна здатність, субпіксельна реєстрація зображень, субпіксельна обробка зображень, мікросканування, мінімальна роздільна різниця температур.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації

1. Kolobrodov V.G Calculation model for optoelectronic remote sensing system's radiometric resolution at arbitrary viewing angles / V. G. Kolobrodov, M. I. Lykholit, V. I. Mykytenko, V. M. Tiagur, K. V. Dobrovolska // Visnyk NTUU "KPI". Seria Radiotekhnika. Radioapparatobuduvannia. – 2017. – №69. – p. 30-34. (входить до наукометричної бази Web of Science)
2. Lyalko V.I. Prototype of satellite infrared spectroradiometer with superresolution / V.I. Lyalko, M.A. Popov, S.A. Stankevich S.A., S.V. Shklyar, V.N. Podorvan, N.I. Likholt, V.M. Tiagur, C.V. Dobrovolska // Journal of Information, Control and Management Systems. – 2014. – Vol.12. – No.2.– p. 153-164. (іноземне видання)
3. Колобродов В.Г. Застосування методів і алгоритмів цифрової обробки зображень в оптико-електронних приладах / В.Г. Колобродов, К.В. Харитоненко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – НТУУ «КПІ». – 2010. – Вип.40, с. 23-31.
4. Даниленко А.Н. Обобщенные характеристики инфракрасных систем поиска и слежения с матричными приемниками излучения / А.Н. Даниленко, В.Г. Колобродов, Е.В. Харитоненко // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2011. – №3, с.5-19.
5. Добровольська К.В. Математичне моделювання тепловізійного приладу спостереження з мікроболометричною матрицею / К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І Лихоліт, В.М. Тягур // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – НТУУ «КПІ». – 2014. – Вип.48(2), с. 28-38.
6. Колобродов В.Г. Методы повышения пространственного разрешения тепловизионных камер с матричными приемниками излучения / В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко // Озброєння і військова техніка. – 2014. – №3. – с. 56-62.

7. Лялько В.И. Физическая модель инфракрасного спектрорадиометра с повышением пространственного разрешения при помощи субпиксельной обработки изображений / В.И. Лялько, М.А. Попов, С.А. Станкевич, С.В. Шкляр, В.Н. Подорван, Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Добровольская // Наука та інновації. – 2015. – 11(6). – с. 16-28.
<http://dx.doi.org/10.15407/scin11.06.016>, ISSN 1815-2066

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Kharitonenko E.V. Image Resolution Enhancement in IR Device With Focal Plane Array / E.V. Kharitonenko, V.G. Kolobrodov, N.I. Lykholit, V.M. Tiagur // 13-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science : Scientific Works, 25-28 October 2012. – Kyiv, Ukraine. – p. 168.
2. Лихолит Н.И. Методы компьютерного повышения разрешения инфракрасных изображений для решения задач дистанционного зондирования Земли / Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «ABIA-2013» Том 4, 21-23 травня 2013 р. – Київ, 2013. – с. 27.52-27.56.
3. Lyalko V.I. Subpixel processing of images from the frame infrared camera for future Ukrainian remote sensing satellite system / V.I. Lyalko, M.A. Popov, S.A. Stankevich, S.V. Shklyar, N.I. Likholt, V.M. Tyagur, C.V. Dobrovolska // Proceedings of the Tenth International Conference on Digital Technologies (DT'2014). – Žilina: University of Žilina, 2014. – p. 232-235.
4. Добровольська К.В. Математична модель тепловізійної камери космічного базування із субпиксельною реєстрацією зображень» / К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур //

14-та Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 8-12 вересня 2014 р. – Київ, 2014 – с.74.

Наукова праця, яка додатково відображає наукові результати дисертації

Пат. 109181 Україна МКВ G01C 3/08. Спосіб підвищення просторової розрізненості при дистанційній зйомці з використанням субпіксельної реєстрації зображень та пристрій для його здійснення / Лихоліт М.И., Лялько В.І., Попов М.О., Станкевич С.А., Тягур В.М., Харитоненко К.В. – Опубл. в Б.І., 2015, №14. – 15 с.

ANNOTATION

Dobrovolska C.V. Spatial resolution enhancement of microbolometer satellite camera. – Qualification scientific work manuscript copyright.

A thesis for a degree of the Doctor of Philosophy in the Faculty of Instrumentation Engineering by speciality 05.11.07 optical devices and systems. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to solving of problem of microbolometer satellite camera spatial resolution enhancement without placing of additional units into the device by processing obtained with subpixel displacements images due to its own motion of the satellite.

Thermal aerospace survey is based on the detection of thermal anomalies by fixing the thermal radiation of objects on the Earth's surface in the infrared spectral region. The temperature heterogeneity of the Earth's surface arises as a result of uneven heating of its various sites. The scope of data from infrared remote sensing images of the Earth covers such areas as the search for minerals and energy, assessment of the state of surface rocks, urban and industrial areas analysis, ecological status of forests assessment, assessment of forest reserves, monitoring

of emergencies: monitoring of forest fires, volcanoes, pollution petroleum products, forecasting of natural and man-made disasters, water resources monitoring, determination of temperature of the Earth's surface and clouds, exploration of cloud cover, analysis and forecasting of climate change, the assessment of soil and more.

In the first chapter, based on the analysis of areas of application and designation of space microbolometer cameras, the main problems of infrared cameras in the field of meteorology, control of the temperature of the surface of the earth and water surfaces, as well as the monitoring of fires and volcanoes were identified. In order to solve mentioned tasks, the received infrared images are subject to complex multilevel and multifaceted digital processing, which causes the imposition of rigid requirements to the images, and, accordingly, to the technical parameters of the cameras. As the primary and most important parameters of the efficiency of infrared space cameras, which are used by manufacturers to evaluate the operation of infrared cameras, namely spatial and energy resolution, are determined. On the basis of comparative analysis of existing satellite microbolometer cameras, their main technical parameters and characteristics, the urgency of the problem of spatial resolution enhancement was revealed, since the resolution of existing infrared cameras does not correspond to the value necessary for the solution of many remote sensing tasks.

Existing methods for image resolution enhancement are considered. Among them, the methods based on microscanning allow you to add more useful information to the resultant high-resolution image. The basic methods for restoring high-resolution images using subpixel images with lower resolution at subpixel processing are presented.

In the second section an advanced mathematical model of microbolometer camera with the consideration of parameters of object, background, optical system and detector, electronic block of processing and signal transmission, on the basis of which the main generalized camera's characteristics are calculated, are criteria for

estimation of spatial and energy resolution. Possible ways of the spatial and energy resolution enhancement of the camera are determined.

The third section is devoted to the theoretical study of the influence of the camera's spatial resolution enhancement process by registration of subpixel shifted due to own satellite motion images to the effectiveness of aerospace photography.

Existing methods of subpixel image registration are considered. The subpixel image registration technology is proposed to enhance the microbolometer camera's spatial resolution due to satellite own motion and the focal plane array rotation relative to the orbital motion without constructive complications. A universal mathematical model of the proposed subpixel image registration technology for camera's spatial resolution enhancement is developed, which allows evaluating the camera's efficiency and their spatial and energy resolution enhancing due to the use of subpixel image registration at the design stage. On the basis of the developed mathematical model of the subpixel image registration process software is created that allows to analyze a large number of subpixel registration modes and to choose parameters of the optimal mode of subpixel image registration, providing the minimum values of registration errors and maximum efficiency of camera's spatial resolution enhancement for different shooting conditions.

Main parameters of the detectors with a range of possible regulation, the possibility of changing the orbit height, the possibility of shooting at different parts of the orbit, the effect of the Earth's rotation, etc., were taken into account in the developed model. In addition, it is possible to use as a subject of subpixel processing only few of the received frames. The criterion for choosing the shooting mode is the value of frame bias errors, the main sources of which are the deviation of the orbit height from the nominal value and the change in the latitude of the shooting area.

The mathematical model of subpixel image processing in the microbolometer camera is presented. The influence of subpixel image registration with subsequent subpixel processing on the camera's energy resolution and the

mathematical model of the camera with the account of this influence have been investigated. The main criteria of the effectiveness of subpixel image processing are considered.

The ways to increase the effectiveness of subpixel image registration are reported. The influence of the subpixel image registration process due to the satellite motion to the spatial and energy resolution of the camera is determined.

The fourth section is devoted to experimental research of the influence of the camera's spatial resolution enhancement process by registration of subpixel shifted due to own satellite motion images to the effectiveness of aerospace photography. The bench equipment for measuring the main characteristics of microbolometer cameras and the effect of applying subpixel image registration on the main characteristics of the camera are considered. The basic methods of carrying out of experimental researches are given. It is shown that the results of experimental research confirmed the results of theoretical research of the camera's spatial resolution enhancement subpixel image registration. It is determined that there is an increase in the camera's spatial resolution at the expected level of mathematical modeling, that is, an average of 1.4 times. Corresponding values of the ground sampling distance (that is step of image points on the Earth's surface) with and without application of the proposed technology for spatial resolution enhancement are calculated.

Key words: microbolometer camera, spatial resolution, energy resolution, subpixel image registration, subpixel image processing, microscan, minimum resolvable temperature difference.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	15
ВСТУП.....	16
 РОЗДІЛ 1 МІКРОБОЛОМЕТРИЧНІ КАМЕРИ ДЛЯ СУПУТНИКІВ.....	23
1.1 Призначення та область застосування космічних мікроболометричних камер.....	23
1.2 Методи цифрової обробки даних ДЗЗ.....	26
1.3 Основні характеристики і параметри мікроболометричних камер.....	32
1.4 Порівняльний аналіз технічних характеристик існуючих аналогів.....	42
1.5 Методи підвищення роздільної здатності зображень.....	44
1.5.1 Найпростіша математична модель мікросканування.....	50
1.5.2 Методи відновлення зображення з високою роздільною здатністю.....	53
Висновки до розділу 1.....	60
 РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МІКРОБОЛОМЕТРИЧНОЇ КАМЕРИ КОСМІЧНОГО БАЗУВАННЯ.....	61
2.1 Узагальнена математична модель мікроболометричної камери.....	61
2.1.1 Математична модель об'єкта спостереження	61
2.1.2 Математична модель пропускання атмосфери.....	69
2.1.3 Математична модель ІЧ об'єктива.....	70
2.1.4 Математична модель приймача випромінювання.....	72
2.1.5 Математична модель електронного блока обробки і передачі сигналу.....	73

2.2 Критерії просторової і енергетичної роздільної здатності мікроболометричної камери.....	74
2.2.1 Просторова роздільна здатність МБК.....	74
2.2.2 Еквівалентна шуму різниця температур.....	76
2.2.3 Мінімальна виявлювальна різниця температур.....	76
2.2.4 Мінімальна роздільна різниця температур.....	77
2.3 Методи визначення просторової і енергетичної роздільної здатності мікроболометричної камери.....	78
2.4 Зменшення впливу геометричного шуму на якість зображення.....	86
2.5 Цифрові методи зменшення похибок дискретизації.....	88
Висновки до розділу 2.....	91

РОЗДІЛ 3 ПІДВИЩЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ І ЕНЕРГЕТИЧНОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ МІКРОБОЛОМЕТРИЧНОЇ КАМЕРИ.....

3.1 Реалізація субпіксельної реєстрації зображень шляхом повороту мікроболометричної матриці на визначений кут відносно напрямку польоту КА.....	92
3.1.1 Методи субпіксельної реєстрації зображень.....	92
3.1.2 Математична модель реєстрації зображень з субпіксельним зміщенням.....	99
3.1.3 Розрахунок параметрів субпіксельної реєстрації зображень із врахуванням обертання Землі.....	102
3.1.4 Вибір оптимального варіанту здійснення субпіксельної реєстрації зображень на основі аналізу похибок.....	107
3.2 Математична модель субпіксельної обробки зображень в МБК.....	119
3.3 Вплив субпіксельної обробки зображень на просторову та енергетичну роздільну здатність мікроболометричної камери.....	129
3.4 Критерії ефективності субпіксельної обробки зображень.....	138
Висновки до розділу 3.....	146

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ І ЕНЕРГЕТИЧНОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ МІКРОБОЛОМЕТРИЧНОЇ КАМЕРИ.....	147
4.1 Основні характеристики мікроболометричних камер для оцінки підвищення просторової і енергетичної роздільної здатності.....	147
4.2 Стендове обладнання для вимірювання основних характеристик МБК.....	149
4.3 Стендове обладнання для вимірювання основних характеристик МБК при субпіксельній реєстрації зображень.....	157
4.4 Результати експериментальних досліджень.....	162
Висновки до розділу 4.....	170
ВИСНОВКИ.....	171
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	173
ДОДАТОК А.....	185
ДОДАТОК Б.....	188
ДОДАТОК В.....	192
ДОДАТОК Г.....	213
ДОДАТОК Д.....	217
ДОДАТОК Е.....	232
ДОДАТОК Ж.....	238

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДЗЗ	Дистанційне зондування Землі
ІЧ	Інфрачервоний
МБК	Мікроболометрична камера
ПВ	Приймач випромінювання
ФПС	Функція передачі сигналу
ФРЛ	Функція розсіювання лінії
ЕШРТ	Еквівалентна шуму різниця температур
МПФ	Модуляційна передавальна функція
АЧТ	Абсолютно чорне тіло
СКЗ	Середньоквадратичне значення
МРРТ	Мінімальна роздільна різниця температур
ОС	Оптична система
ВРЗ	Висока роздільна здатність
НРЗ	Низька роздільна здатність
МБМ	Мікроболометрична матриця
МВРТ	Мінімальна виявлювальна різниця температур

ВСТУП

Актуальність теми. Останнім часом дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) знаходиться в стадії інтенсивного розвитку, спричиненого вдосконаленням існуючих технічних засобів зйомки поверхні Землі та розширенням кола задач, які постають перед науковими, адміністративними, військовими та силовими структурами. Завдяки використанню космічних зображень досягається значне підвищення ефективності діяльності в таких галузях як загальне географічне та тематичне картографування, землекористування, контроль джерел забруднення навколишнього середовища та спостереження за екологічним станом в цілому [84], гідротехніка та меліорація, лісове господарство, планування та забезпечення пошуку корисних копалин, прокладання раціональних маршрутів та зниження аварійності транспортних шляхів, океанологія та рибне господарство, проведення кліматологічних досліджень тощо.

Особливо актуальними останнім часом стали задачі контролю стану навколишнього середовища. Зображення, отримані в дальньому інфрачервоному (ІЧ) діапазоні, використовуються головним чином для вирішення таких задач як виявлення лісових пожеж, нафти на шельфах морів та океанів [71].

Співвідношення таких найважливіших характеристик камер космічного базування як просторова роздільна здатність та енергетична роздільна здатність безпосередньо впливає на ефективність вирішення задач ДЗЗ. Просторова роздільна здатність головним чином визначається кількістю та розмірами елементів приймача випромінювання. Енергетична роздільна здатність залежить від просторової роздільної здатності приладу, параметрів приймача випромінювання тощо. В сучасних камерах космічного базування для отримання ІЧ зображень поверхні Землі широко застосовуються неохолоджувані мікроболометричні матриці [29]. Вони дозволяють значно зменшити вартість камери, спростити конструкцію та забезпечити достатню

енергетичну роздільну здатність [24].

Забезпечення високої просторової роздільної здатності космічних зображень при незмінному значенні поля огляду вимагає збільшення кількості пікселів мікроболометричних матриць. Але це призводить до суттєвого ускладнення конструкції апаратури та підвищення її вартості. Крім того, технологія виготовлення пікселів приймачів накладає жорсткі обмеження на збільшення їх кількості. Відомі методи підвищення просторової роздільної здатності космічних камер без зміни параметрів приймачів випромінювання часто потребують введення до камери додаткових пристроїв, які ускладнюють конструкцію [20]. Тому підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери без конструктивних ускладнень за рахунок власного руху супутника є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в Казенному підприємстві спеціального приладобудування «Арсенал» та Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і пов'язана з наступними науково-технічними проектами та роботами, виконаними за участю автора:

- науково-технічний проект «Технологія підвищення просторової розрізненості зображень, що отримуються матричною знімальною камерою космічної системи «Січ» за допомогою субпіксельного оброблення» за договором № 10 відповідно до розпорядження Президії НАН України від 27.02.2013 р. № 133 (РК № 0113U000913);
- науково-дослідна робота «Розробка методик розрахунку просторового і енергетичного розділення ІЧ камери космічного базування з мікроболометричною матрицею» за договором № 453/4 від 29.05.2013 р.;
- науково-технічний проект «Фізична модель інфрачервоного спектро радіометра з підвищенням просторової розрізненості за допомогою субпіксельного оброблення зображень» за договором № 13 відповідно до розпорядження Президії НАН України від 05.03.2014 №142 (РК №

0114U001665);

- науково-дослідна робота №2721п «Розробка методів і розрахункового інструментарію для об'єктивної оцінки просторового і енергетичного розділення космічних інфрачервоних камер дистанційного зондування Землі» (0114U003421).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери (МБК) для супутника без введення до приладу додаткових пристроїв шляхом обробки субпіксельно зміщених за рахунок власного руху носія знімальної апаратури зображень.

Мета досягається вирішенням наступних задач:

1. Обґрунтувати необхідність підвищення просторової роздільної здатності камери на основі порівняльного аналізу існуючих мікроболометричних камер, областей їх застосування, основних технічних параметрів і характеристик та визначити метод підвищення просторової роздільної здатності камери для супутника.
2. Дослідити узагальнену математичну модель мікроболометричної камери космічного базування, яка враховує параметри фону, об'єкту, оптичної системи та приймача випромінювання.
3. Побудувати та дослідити математичну модель субпіксельної реєстрації зображень в МБК.
4. Дослідити вплив застосування субпіксельної реєстрації зображень на просторову та енергетичну роздільну здатність МБК.
5. Провести експериментальні дослідження процесу реєстрації субпіксельно зміщених зображень з метою підвищення просторової роздільної здатності камери.

Об'єктом дослідження є процес формування зображення в мікроболометричній камері космічного базування методом реєстрації та обробки субпіксельно зміщених зображень.

Предметом дослідження є методи підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери шляхом реєстрації субпіксельно зміщених за рахунок власного руху супутника зображень.

Методи дослідження. З метою розв'язання поставлених задач в роботі використовується математичне моделювання процесів перетворення сигналів ІЧ випромінювання від поверхні Землі до електричних сигналів з приймача випромінювання, математичні основи теорії оптико-електронних приладів, комп'ютерне моделювання оптико-електронних приладів, експериментальні дослідження характеристик камери.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Запропоновано новий метод субпіксельної реєстрації зображень для підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери за рахунок власного руху супутника та повороту матричного приймача випромінювання відносно орбітального руху.
2. Вперше розроблена універсальна математична модель субпіксельної реєстрації зображень для забезпечення підвищення просторової роздільної здатності камери, яка дозволяє розрахувати набір параметрів для організації різних режимів субпіксельної реєстрації зображень з мінімальними похибками реєстрації.
3. В результаті дослідження впливу застосування субпіксельної реєстрації зображень на просторову та енергетичну роздільну здатність камери встановлено залежності просторової та енергетичної роздільної здатності камери від параметрів режиму субпіксельної реєстрації в різних спектральних діапазонах.

Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному.

1. Методика розрахунку характеристик мікроболометричної камери із застосуванням субпіксельної реєстрації зображень дозволяє оцінювати ефективність роботи мікроболометричних камер та підвищення їх просторової та енергетичної роздільної здатності внаслідок застосування субпіксельної реєстрації зображень на етапі проектування.

2. Алгоритм розрахунку параметрів різних режимів зйомки із застосуванням субпіксельної реєстрації зображень та розроблене програмне забезпечення на основі побудованої математичної моделі процесу субпіксельної реєстрації зображень дозволяє вибрати параметри режиму субпіксельної реєстрації зображень, який забезпечує мінімальні значення похибок реєстрації і максимальну ефективність підвищення просторової роздільної здатності камери для різних умов зйомки.

На запропонований метод субпіксельної реєстрації було отримано патент України на винахід [64]. Отримані результати були використані на КП СПБ «Арсенал», що підтверджується відповідним актом впровадження.

Особистий внесок здобувача.

Основна частина теоретичних та експериментальних досліджень, висновків та рекомендацій виконана автором самостійно. Без співавторства опубліковано три тези доповідей [82, 79, 47]. В основних роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить наступне:

1. Досліджено математичну модель мікроболометричної камери із врахуванням параметрів об'єкту, фону, оптичної системи та приймача випромінювання.

2. Побудовано математичну модель процесу субпіксельної реєстрації зображень для підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери за рахунок власного руху супутника та повороту приймача випромінювання відносно орбітального руху. Розроблено методику розрахунку та аналізу похибок, що виникають в процесі субпіксельної реєстрації зображень, та причини їх виникнення. На основі побудованого алгоритму розроблено програмне забезпечення для розрахунку параметрів режиму реєстрації для забезпечення вибору режиму реєстрації з мінімальними похибками відповідно до умов зйомки.

3. Досліджено вплив процесу підвищення просторової роздільної здатності камери шляхом реєстрації субпіксельно зміщених за рахунок власного руху супутника зображень на енергетичну роздільну здатність

мікроболометричної камери та експериментально підтверджено теоретичні дослідження.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження обговорювалися на 18 науково-технічних конференціях:

- III - V науково-практичні конференції студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», 2010 – 2012 роки, м. Київ.
- XI, XIII, XIV Міжнародні науково-технічні конференції «Приладобудування: стан і перспективи», м. Київ, 2012, 2014, 2015 роки;
- 13-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science «SPO», м. Київ, 25-28 жовтня 2012 р.;
- XII, XVI Міжнародні науково-практичні конференції «Людина і космос» м. Дніпропетровськ, 2010 р., 2014 р.;
- 6-а Міжнародна студентська науково-технічна конференція «Новые направления развития приборостроения», м. Мінськ, 2013 р.;
- XI Міжнародна науково-технічна конференція «ABIA-2013», м. Київ, 21-23 травня 2013 р.;
- 8-а міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій - 2014», м. Київ;
- Tenth International Conference on Digital Technologies, м. Жиліна, Словачія, 2014 р.;
- Міжнародна науково-практична конференція «Безпека в цивільному захисті», м. Київ, 2014
- 14-та Українська конференція з космічних досліджень, м. Ужгород, 8-12 вересня 2014 р.;
- 15-та та 16-та Українська конференція з космічних досліджень, м. Одеса, серпень 2015, 2016 років;
- Українська науково-технічна конференція «Авіакосмічне приладобудування», м. Київ, КП СПБ «Арсенал», 10-11 грудня 2014 р.

Публікації. По матеріалам дисертації опубліковано 32 праці, в тому

числі 7 статей в фахових наукових виданнях, 24 тези доповідей на конференціях, отримано 1 патент України на винахід.

Структура та об'єм дисертації.

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури та 7 додатків. Повний об'єм дисертації 238 сторінок, з об'ємом основного тексту 173 сторінок. Дисертація містить 54 рисунки, 14 таблиць, список використаної літератури з 85 найменувань на 12 сторінках і 7 додатків на 53 сторінках.

РОЗДІЛ 1

МІКРОБОЛОМЕТРИЧНІ КАМЕРИ ДЛЯ СУПУТНИКІВ

1.1 Призначення та область застосування космічних мікроболометричних камер

Теплова аерокосмічна зйомка базується на виявленні теплових аномалій шляхом фіксації теплового випромінювання об'єктів на поверхні Землі в інфрачервоній (ІЧ) області спектру [58]. Температурні неоднорідності поверхні Землі виникають в результаті неоднакового нагрівання її різних ділянок. Інфрачервоний діапазон спектру умовно поділяється на три частини:

- ближній ІЧ 0,74 - 1,35 мкм;
- середній ІЧ 1,35 - 3 мкм;
- дальній ІЧ 3 - 1000 мкм.

ІЧ випромінювання, проходячи через атмосферу, вибірково поглинається, у зв'язку з чим теплова аерокосмічна зйомка проводиться в зоні розташування так званих «вікон прозорості» - ділянках спектру, де випромінювання пропускається атмосферою. Межі декількох основних вікон прозорості атмосфери, зображених на рис. 1.1, мають наступні значення [75]: 0,74 - 2,40 мкм; 3,40 - 4,20 мкм; 8,0 - 14,0 мкм; 30,0 - 80,0 мкм.

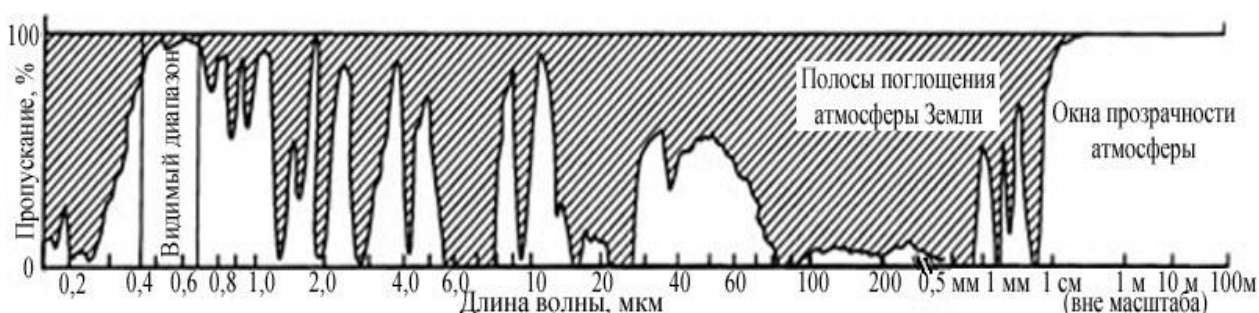


Рис. 1.1. Вікна прозорості атмосфери Землі

Варто відмітити, що зі збільшенням довжини хвилі частка відбитого сонячного випромінювання зменшується, а частка власного випромінювання об'єктів ДЗЗ збільшується. Об'єкти з підвищеною тепловіддачею в

навколишнє середовище, такі як атомні і теплові електростанції, системи міського та промислового теплопостачання, нафтогазові та металургійні підприємства, а також високоенергетичні явища (землетруси, лісові пожежі, виверження вулканів характеризуються підвищеною інтенсивністю власного випромінювання в діапазоні 8 – 14 мкм.

Область застосування даних ІЧ знімків ДЗЗ охоплює наступні галузі [48]:

- пошук корисних копалин та енергоносіїв;
- оцінка стану поверхневих порід;
- аналіз урбанізованих та промислових територій;
- оцінка екологічного стану лісів, оцінка запасів лісів;
- моніторинг надзвичайних ситуацій: спостереження за лісовими пожежами, вулканами, забрудненням нафтопродуктами, прогнозування природних та техногенних катастроф;
- моніторинг водних ресурсів: визначення температури водної поверхні, вивчення ресурсів океану, виявлення забруднень та їх джерел;
- визначення температури земної поверхні та хмар;
- вивчення хмарного покриву, аналіз та прогнозування кліматичних змін;
- оцінка стану ґрунтів.

Для роботи в спектральному діапазоні 8 – 14 мкм виділяють два основних класи приймачів випромінювання (ПВ): охолоджувані та неохолоджувані приймачі. Основною перевагою охолоджуваних ПВ є висока енергетична чутливість. До недоліків даного типу ПВ відносять [32]:

- відносно висока споживана потужність;
- необхідність виходу на робочий температурний режим;
- відносно великі габарити, вага та вартість через наявність системи охолодження;

Відповідно основними перевагами неохолоджуваних ПВ є:

- невеликі габарити та вага;
- швидкий вихід на робочий режим відразу після включення;

- низька споживана потужність;
- більша надійність і термін служби;
- відносно невелика вартість.

Основним недоліком неохолоджуваних ПВ є низька чутливість в порівнянні з охолоджуваними ПВ.

Одним з аналогів космічної камери з мікроболометричним ПВ - NIRST (New IR Sensor Technology) – ІЧ радіометр на супутнику SAC-D (AQUARIUS), розроблений Канадою та Аргентиною був призначений для виявлення високотемпературних об'єктів за випромінюванням в ІЧ області спектру [60]. МБК NIRST містить дві камери середнього ІЧ ($\Delta\lambda_1=3,4\dots4,2$ мкм) та дальнього ІЧ ($\Delta\lambda_2=10,4\dots11,3$ мкм та $\Delta\lambda_3=11,4\dots12,3$ мкм) діапазонів, кожна з яких використовує мікроболометричну лінійку розміром 512×3 пікселів.

Спектральні канали вибрані із врахуванням максимальної ефективності виявлення вогню та вимірювання температури земної поверхні, як видно з рис. 1.2, де положення спектральних каналів позначено стрілками. З висоти орбіти 657 км вони мають роздільну здатність 351 м на поверхні Землі і смугу 182 км. Фокусна відстань лінзових германієвих об'єктивів для камер становить 73 мм при відносному отворі 1:1 і величині поля зору $2\omega=15,6^\circ$.

Мікроболометричні ПВ були розроблені спеціально для цієї місії Канадським космічним агентством. Канали $\Delta\lambda_2=10,4\dots11,3$ мкм та $\Delta\lambda_3=11,4\dots12,3$ мкм формуються інтерференційними фільтрами на захисному вікні матриці.

Третя лінійка використовується як опорна для компенсації температурного дрейфу. Розмір пікселя складає 39 мкм. Габаритні розміри приладу дорівнюють $350\times400\times500$ мм³.

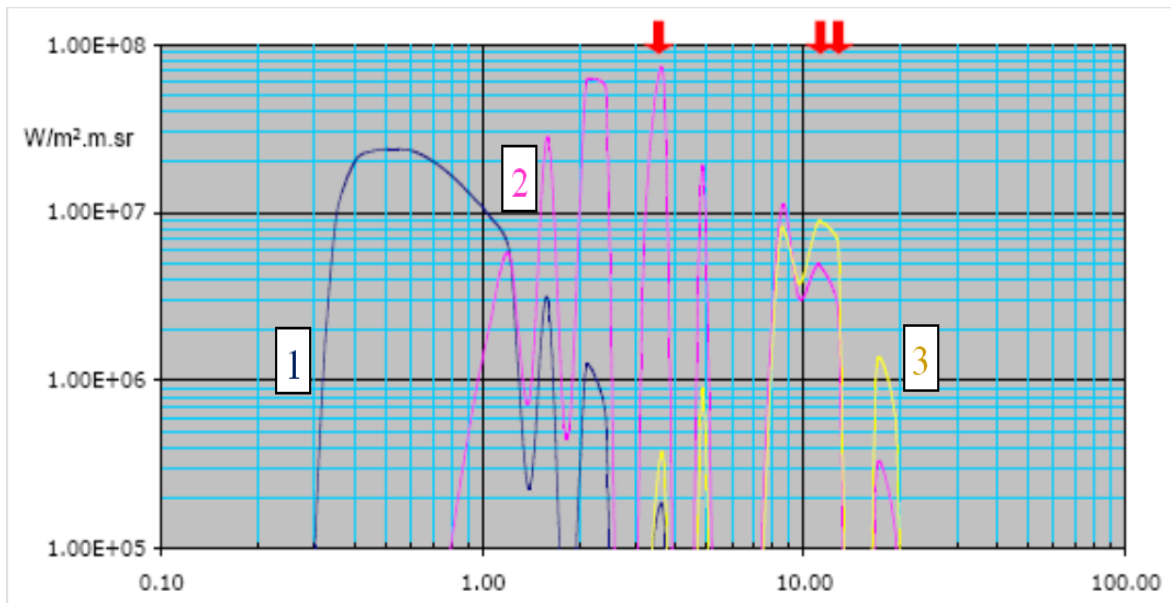


Рис. 1.2. Положення спектральних каналів камери NIRST на графіку спектрального випромінювання вогню та поверхні Землі:

- 1 – відбите сонячне випромінювання (60° від зеніту);
- 2 – випромінювання від пожежі 1000°K (площею, що відповідає площі 2% пікселя);
- 3 – випромінювання від поверхні Землі (300°K).

1.2 Методи цифрової обробки даних ДЗЗ

Інтенсивний розвиток ДЗЗ в останні десятиріччя спричинив суттєвий ріст об'ємів, різноманіття і якості матеріалів аерокосмічної зйомки [49]. На наш час накопичено величезний фонд аерокосмічних знімків всієї поверхні Землі.

Частина даних ДЗЗ відразу поступає в цифровому вигляді, що дозволяє безпосередньо використовувати для їх обробки сучасні комп'ютерні технології. Цифрове зображення представляє собою матрицю чисел, кожний елемент якої (піксель) відповідає певній характеристиці (наприклад, температурі) ділянки місцевості в певній області спектру. Розмір цієї ділянки визначається роздільною здатністю знімка.

Системи обробки даних ДЗЗ фактично з'явилися в результаті подальшого якісного розвитку програмних засобів, призначених для цифрової обробки зображень загального спрямування. Обидва класи систем мають багато спільного: працюють з растровою моделлю даних, використовують методи обробки зображень на основі спільного математичного апарату тощо. Однак слід відмітити ряд суттєвих відмінностей, пов'язаних зі специфікою даних ДЗЗ [48].

1. Дані ДЗЗ – це перш за все файли великого об'єму, для ефективної роботи з якими необхідні спеціальні засоби, в тому числі й особливі формати даних.
2. Дані ДЗЗ – це багатовимірні дані, крім різних спектральних каналів можуть використовуватися й інші координати вимірювання, наприклад, час.
3. Дані ДЗЗ потребують попередньої геометричної, радіометричної та радіаційної корекції.
4. Дані ДЗЗ – це просторова інформація, що має, як правило, координатну прив'язку.
5. Можливість швидкого переходу від попередньої обробки і тематичного дешифрування до виконання операцій моделювання і просторового аналізу засобами геоінформаційних систем.

Цифрову обробку даних ДЗЗ можна розділити на наступні типові групи операцій [36].

1. Відновлення або корекція
2. Попередня обробка
3. Класифікація
4. Спеціальна тематична обробка

Розглянемо докладніше деякі з цих груп.

Відновлення або корекція відеоінформації. Основною задачею відновлення зображень ДЗЗ є виправлення отриманих даних з метою досягнення якомога більш правдоподібного зображення земної поверхні.

Дані ДЗЗ містять ряд випадкових, системних і систематичних спотворень, пов'язаних з впливом атмосфери, кривизни Землі, руху знімального апарату відносно її поверхні, фізичними характеристиками датчиків, які використовуються і каналів зв'язку. Для видалення згаданих спотворень із врахуванням їх специфіки використовується корекція кількох видів: радіаційна, радіометрична, геометрична та калібрування. Радіаційне відновлення пов'язане з коректуванням кількості електромагнітної енергії, яку сприймає кожний датчик, оскільки атмосфера не однаково пропускає випромінювання в різних спектральних діапазонах. Калібрування полягає в перетворенні безрозмірних сигналів, отриманих з приймача в окремих спектральних смугах, в істинні нормовані значення випроміненої енергії. Операція радіометричної корекції пов'язана з усуненням спотворень, які вносять ПВ, пристрої передачі і прийому даних. Геометрична корекція, або трансформування знімків призначено для усунення спотворень, спричинених кривизною і обертанням Землі, а також кутом нахилу орбіти супутника до площини екватору. Корекція такого типу на першому етапі може здійснюватися автоматично по інформації о параметрах орбіти супутника. Більш точне трансформування і прив'язка знімку до певної координатної системи звичайно виконується за допомогою опорних точок, які задаються інтерактивним способом [73]. В процесі трансформування здійснюється перерахування значень пікселів на нову сітку растру, при цьому форми об'єктів на зображенні змінюються в тій чи іншій мірі. Часто для представлення і сумісної обробки матеріалів різних типів зйомки, а також знімків тієї ж самої території в різний час, використовується проекція, яку називають ортопланом і застосовують в світовій практиці в якості обмінного стандарту. При геометричній корекції фотографічних зображень ВРЗ видаляються спотворення, які виникають за рахунок різного рельєфу місцевості.

Попередня обробка зображень. Основною задачею цієї групи операторів – модифікація даних з метою покращення зорового сприйняття

зображення, або перетворення його в форму, зручнішу для подальшого візуального або комп'ютерного аналізу. За особливостями організації обробки даних операції цієї групи можна розбити на декілька типів. До першого типу відносять модифікації значень кожного окремого пікселя, які виконуються, як правило, з використанням табличного способу представлення функції перетворення (таблиця перекодування). До цього типу відносять різні види лінійного і нелінійного контрастування, призначені для покращення візуального сприйняття відеоінформації [35].

Наступний тип – це локальні операції, особливістю яких є модифікація значення кожного елементу зображення з використанням значень сусідніх пікселів в межах вікна певного розміру. Типовими перетвореннями цього типу є операції фільтрації зображень. Низькочастотні фільтри або фільтри згладжування видаляють шум і дрібні деталі, що дозволяє отримати більш однорідні ділянки зображення для подальшої обробки з метою виявлення тих чи інших об'єктів [85]. Високочастотні фільтри призначені для виділення або підкреслювання перепадів значень сигналів від пікселів. Ця властивість використовується при пошуку на зображенні границь об'єктів і виявленні різноманітних структур, що проявляються у вигляді зсуву або стрибку значень сигналу від пікселів зображення. Перетворення геометричних характеристик зображення складають наступний вид розглянутої групи операцій. До них відносять: монтаж (мозаїку) зображень з окремих знімків або їх фрагментів [20], вирізання потрібного фрагменту, стиснення зображення або його розтягнення тощо. Ще один вид операцій призначений для створення різноманітних кольорових композицій, оптимальних для візуального сприйняття. Ця група перетворень дозволяє отримувати кольорові зображення в умовних (помилкових) кольорах і псевдокольорах, що є одним із способів обробки багатовимірних даних.

Класифікація. Класифікація – це тематична обробка, яка дозволяє здійснювати автоматизоване розбиття знімків на однорідні ділянки за якимось критерієм (класи об'єктів). Отримане таким чином зображення

називають тематичною картою. Оскільки звичайно виділяють класи об'єктів, зміст яких можна інтерпретувати, то класифікацію можна розглядати як процедуру автоматичного дешифрування даних ДЗЗ [38]. Процедура класифікації частіше за все базується на статичному аналізі різноманітних характеристик зображення: просторових, спектральних або часових. До простіших корисних просторових характеристик відносять текстуру, контекст, форму і структурні відношення [48]. Під часовими характеристиками слід розуміти сезонні зміни земного покриву (особливо рослинності), які можуть слугувати їх індикаторами. Проте, вважають, що основну інформацію о природі об'єктів на земній поверхні несуть їх спектральні характеристики. Тому в більшості відомих алгоритмів класифікації використовують спектральні характеристики (сігнатури) типів покриття.

Розрізняють два основних методологічних підходи до проведення розглянутої процедури: класифікацію з навчанням і автоматичну класифікацію. У випадку класифікації з навчанням задача полягає у виявленні на зображенні об'єктів вже відомих типів, що потребує деяких попередніх відомостей про досліджувану ділянку земної поверхні. Однак більшою популярністю користується інший тип класифікації, який не потребує додаткової наземної інформації і глибокого знання дистанційних методів обробки. Методологічною основою автоматичної класифікації є кластерний аналіз, під час якого намагаються визначити всі типи об'єктів на деякому рівні узагальнення, а задача їх інтерпретації вирішується на другому етапі. Також існують алгоритми, які суміщають елементи обох типів класифікації. За способом віднесення окремих елементів до одного чи іншого класу об'єктів, розрізняють жорсткі і м'які класифікатори. У випадку жорстких (традиційних) класифікаторів приймається строго визначене рішення відносно належності пікселів до певного класу. М'які ж класифікатори оцінюють ймовірність, з якою елемент зображення, що аналізується, може належати до всіх розглянутих класів покриття земної

поверхні. Ще один порівняно новий вид класифікації пов'язаний з обробкою гіперспектральних даних. Такі дані поступають з експериментальних систем ДЗЗ, які працюють з великою кількістю дуже вузьких спектральних смуг. В такому випадку для автоматизованого виділення класів об'єктів використовуються бібліотеки спектральних кривих різноманітних земних матеріалів [60].

Часто виникає необхідність тематичного коректування результатів класифікації, особливо автоматичної. Для цього використовується цілий набір процедур, які називають операціями післякласифікаційної обробки: злиття класів, розділення класів, видалення дрібних помилкових об'єктів, згладжування границь об'єктів тощо.

Важливим етапом в процесі класифікації є оцінка точності отриманих зображень, яка може виконуватися як за даними польових вимірювань, так і шляхом порівняння з відповідними тематичними картами.

Перетворення зображень. Ця група операцій дозволяє створювати нові (вторинні) зображення в результаті математичних перетворювань декількох спектральних зон первинного зображення. Даний вид операцій часто називають алгеброю зображень. Прикладом широко розповсюджених вторинних зображень є різноманітні вегетаційні індекси, які обчислюються як лінійна комбінація інфрачервоного і червоного спектральних каналів.

Спеціалізована тематична обробка. До цієї групи відносять операції виділення специфічних природних або антропогенних об'єктів. Звичайно такі об'єкти виявляються саме по характерних особливостях. Наприклад, до цього типу можна віднести операції, призначенні для виділення лінійних або кільцевих структур [36].

Таким чином, обробка даних ДЗЗ є складною, містить багато рівнів та залежить від задач, які вирішуються. Ці фактори спричиняють виникнення жорстких вимог до ІЧ зображень. Для забезпечення якісних та точних ІЧ знімків необхідні жорсткі вимоги до технічних параметрів і характеристик ІЧ камер.

1.3 Основні характеристики і параметри мікроболометричних камер

За функціональними ознаками ІЧ системи зображення в загальному випадку розподіляються на дві основні групи: ІЧ камери для спостереження і ІЧ камери для здійснення вимірювань [5]. ІЧ камери першої групи частіше використовуються у військовій техніці, а другої групи – у виробництві та науці, головним чином для дистанційного вимірювання розподілу температур поверхні об'єктів. На сучасному етапі розвитку техніки межа між цими двома групами є невизначеною, оскільки існують МБК, які можна використовувати як для спостереження, так і для вимірювань. Однак більшість камер для спостереження не здатні вимірювати температуру об'єктів, а якість зображення камер для вимірювань на порядок нижче за якість зображень, отримуваних камерами для спостереження.

Зображення, отримувані камерами, в основному спостерігаються людиною, тому розповсюдженим є їх оцінювання з використанням зорового апарату людини [64, 57]. Але навіть експерту складно оцінити якість ІЧ зображення. Для точного оцінювання камери необхідним є вимірювання цілої низки параметрів. Параметром називають кількісне вимірювання камери. Як правило, вимірювання проводяться в лабораторіях, але вони дозволяють передбачити особливості функціонування приладів в реальних умовах спостереження.

Визначення параметрів ІЧ камер є відносно добре стандартизованим. В [5] пропонується всі параметри для оцінювання роботи ІЧ камер можна розділити на наступні групи:

- суб'єктивні параметри якості зображення;
- параметри чутливості;
- параметри шуму;
- параметри роздільної здатності зображень;
- геометричні параметри;

- параметри точності;
- спектральні параметри;
- функціональні параметри.

Суб'єктивні параметри якості зображення надають інформацію про можливості системи «камера – людина-спостерігач» виявляти, розділяти та ідентифікувати об'єкти різних типів [55]. Параметри чутливості представляють дані про відгук ІЧ камери на об'єкти з різними розмірами або температурами. Шумові параметри характеризують шуми, які обмежують виявлення об'єктів з низьким контрастом. Параметри роздільної здатності зображення містять інформацію про можливість камери сприймати дрібні деталі зображення з високим контрастом. Геометричні параметри говорять про геометричні відношення між об'єктом і його зображенням. Параметри точності забезпечують інформацію про точність дистанційного вимірювання температур ІЧ камерами. Функціональні параметри містять дані про положення цілі (або ока спостерігача, необхідні для нормального функціонування приладу. Спектральні параметри характеризують залежність чутливості камер від довжини хвилі.

Суб'єктивні параметри якості зображення, параметри чутливості, шумові параметри, параметри роздільної здатності і геометричні параметри забезпечують основну інформацію про ефективність роботи ІЧ камер спостереження. Параметри точності мають особливе значення для оцінки ІЧ камер для вимірювання температур. Функціональні параметри забезпечують інформацію про деякі практичні аспекти роботи МБК різних типів.

До суб'єктивних параметрів якості зображень відносяться:

- мінімальна виявлювальна різниця температур (МВРТ) *MDTD* – Minimum Detectable Temperature Difference;
- мінімальна роздільна різниця температур (МРРТ) – *MRTD* – Minimum Resolution Temperature Difference;
- розпізнавання орієнтації трикутника (POT) – TOD – Triangle Orientation Discrimination.

До параметрів чутливості відносять функцію відгуку (responsivity function), функцію передачі сигналу (ФПС) SiTF – Signal Transfer Function, динамічний діапазон (Dynamic range), рівень насичення сигналу (saturation level) та інші.

До шумових параметрів відносять:

- еквівалентну шуму різницю температур (ЕШРТ) *NETD* – Noise Equivalent Temperature Difference;
- неоднорідність;
- $1/f$ шум;
- спектральну щільність шуму NSPD – Noise Power Spectral Density, тощо.

До параметрів роздільної здатності зображень відносять кількість пікселів зображення, миттєве поле зору, модуляційну передавальну функцію (МПФ) MTF – Modulation Transfer Function, функцію розсіювання лінії (ФРЛ) SRF – Slit Response Function, функцію передачі контрасту CTF – Contrast Transfer Function.

До параметрів точності відносять мінімальну похибку (Minimal Error), NETD, стабільність температури тощо. До геометричних відносять поле зору, збільшення оптичної системи, дисторсію.

Спектральні параметри характеризують залежність чутливості камер від довжини хвилі випромінювання. Вимірювання функціональних та спектральних параметрів ІЧ камер несуттєво відрізняється від вимірювання аналогічних параметрів візуальних систем.

Параметри шуму є важливим критерієм оцінки ІЧ камер. В загальному випадку присутній в ІЧ зображенні шум можна розділити на дві групи: часовий та просторовий. Часовий шум – це часові коливання сигналу від пікселів приймача під час спостереження однорідного об'єкту. Тобто це коливання сигналу від кадру до кадру в камерах з матричним ПВ. Просторовий шум виникає через різницю між сигналами від різних пікселів при спостереженні однорідного об'єкту, які не змінюються від кадру до кадру.

В літературі можна знайти три основні підходи до аналізу шуму ІЧ зображень [5].

1. Тримірна модель шуму, яка розглядає його 8 компонентів. Візуалізація при цьому здійснюється у вигляді багатомірних зображень або чисел.
2. Шум характеризується єдиним параметром, представленим у вигляді числа.
3. Шум характеризується чотирма параметрами, представленими числами.

В технічних даних більшості ІЧ камер виробниками приводиться параметр, який називають «теплова чутливість», «температурна роздільна здатність», «теплова роздільна здатність» або ЕШРТ [57]. Даний параметр містить інформацію про шум МБК. При цьому в літературі використовуються різноманітні поняття і методики вимірювання цього параметру. На рис. 1.3 представлено ІЧ зображення тест-об'єкта для вимірювання ЕШРТ.

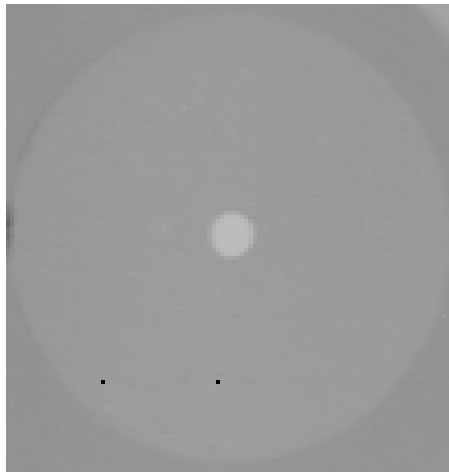


Рис. 1.3. ІЧ зображення тест-об'єкта для вимірювання ЕШРТ

Класичне визначення ЕШРТ, як різниці температур об'єкту та фону, які випромінюють як абсолютно чорне тіло (АЧТ), необхідної для отримання максимального відношення сигналу до середньоквадратичного значення шуму, рівного одиниці, було розроблене в часи, коли використовувалися лише камери зі скануванням. Тому деякі автори вважають, що ЕШРТ – це

міра тільки високочастотного часового шуму в рядку розгортки, хоча визначення й не стверджує це безпосередньо. Згідно з [5], ЕШРТ звичайно не характеризує просторовий шум між різними рядками розгортки, оскільки часові низькочастотні зміни виправлені перед його вимірюванням. Для випадку застосування матричних ПВ в ІЧ камерах часто використовуються різні визначення ЕШРТ. ЕШРТ також визначається як різниця температур, необхідна для отримання відношення сигнал/шум, рівного одиниці. Вихідними даними для розрахунку параметру є послідовність зображень однорідного об'єкту. Однак виникають розбіжності в методах розрахунків середньоквадратичного значення (СКЗ) шуму. В літературі пропонуються наступні методи розрахунку СКЗ шуму.

1. Розрахунок стандартного відхилення часових коливань сигналу від одного пікселя.
2. Розрахунок стандартного відхилення часових і просторових коливань сигналів від групи пікселів.
3. Розрахунок стандартного відхилення часових і просторових коливань сигналів групи пікселів після корекції просторового шуму.

В першому випадку ЕШРТ описує часові коливання шуму одного пікселя. В другому випадку ЕШРТ є критерієм оцінки загального шуму (і часових і просторових коливань). В третьому випадку ЕШРТ – середній шум групи пікселів в часі. Всі три методи можуть використовуватися при наявності або відсутності низькочастотної корекції [5]. Таким чином, в залежності від наявності низькочастотної корекції ЕШРТ може характеризувати або тільки високочастотний шум, або шум у всій смузі частот.

ЕШРТ є корисним критерієм оцінки шуму, але при умові, що абсолютно точно відомо, як він вимірювався. Деякі автори вважають, що різниця значень ЕШРТ, розрахованих різними способами, може бути значною, особливо для камер з не охолоджуваними ПВ, в яких загальне значення шуму в декілька разів перевищує його часову складову.

МВРТ – суб’єктивний параметр, що описує здатність системи «МБК - людина» виявляти об’єкти малих розмірів. МВРТ є функцією залежності мінімальної різниці температур між круглим об’єктом та фоном, необхідної для виявлення об’єкту спостерігачем, від просторового розміру об’єкту. На рис. 1.4 представлені ІЧ зображення двох круглих об’єктів з різними кутовими розмірами.

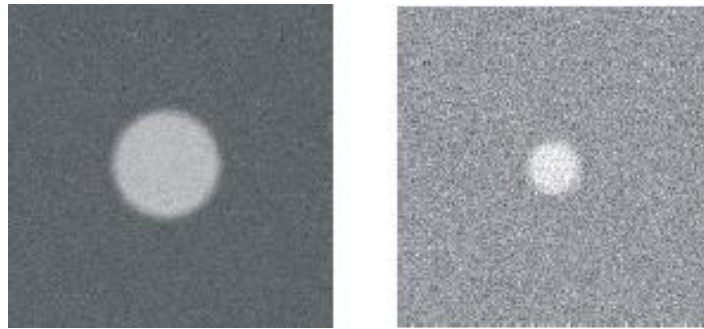


Рис. 1.4. ІЧ зображення двох круглих об’єктів з різними кутовими розмірами

МРРТ – це суб’єктивний параметр, який описує здатність системи «МБК - людина» виявляти деталі зображення з низьким контрастом. МРРТ є функцією залежності мінімальної різниці температур між штрихами стандартної міри та фоном, необхідної для розділення штрихів на зображенні спостерігачем, від просторової частоти міри.

На рис. 1.5 представлено зовнішній вигляд 4-хштрихової міри (а) і приклад ІЧ зображення (б).

На практиці об’єкти знаходяться на нерівномірному фоні, и МРРТ вважається найважливішою характеристикою МБК. Класична МРРТ, яка є суб’єктивним параметром, враховує зорові особливості спостерігача [68]. Така суб’єктивність і тривалість вимірювань недопустима для серійного випуску великої кількості приладів.



Рис. 1.5. Зовнішній вигляд 4-хштрихової міри (а) і приклад ІЧ зображення (б)

В такому випадку використовують так звану автоматичну МРРТ (AutoMRTD), яка дозволяє швидко та об'єктивно оцінити МРРТ приладів, базуючись на вимірюванні параметрів ЕШРТ та МПФ, та вимірних значеннях МРРТ великої кількості приладів такого типу [5]. При виробництві невеликої кількості приладів користуються тільки класичним поняттям МРРТ.

Автоматичну МРРТ знаходять за наступним алгоритмом [5].

1. Вимірюють МРРТ, ЕШРТ та МПФ значної кількості камер.
2. Розраховують середнє значення МРРТ, ЕШРТ та МПФ протестованих камер.
3. Розраховують коефіцієнтну функцію:

$$K(\nu) = \frac{MRTD(\nu) \cdot MTF(\nu)}{NETD} \quad (1.1)$$

4. Знаходять нову об'єктивну МРРТ будь-якої нової камери, що тестується.

$$MRTD_{auto}(\nu) = \frac{K(\nu) \cdot NETD}{MTF(\nu)} \quad (1.2)$$

В наш час класична МРРТ вважається одним з найважливіших параметрів МБК, однак в літературі неодноразово згадується про некоректну оцінку камер при застосуванні поняття класичної МРРТ до зображень з недостатньою вибіркою [5, 33, 55].

Існує щонайменше три альтернативних шляхи підвищення ефективності контролю роботи ІЧ камер. Динамічна МРРТ – різновид МРРТ, що передбачає зсув тест-об'єкту відносно сітки вибірки з оптимальною

швидкістю (приблизно піксель за кадр) [5]. Такий спосіб вимірювання дозволяє оку спостерігача інтегрувати за різними фазовими положеннями тест-об'єкту, і останній сприймається на просторових частотах, значно вищих за частоту Найквіста приймача. Однак, такий рух тест-об'єкту під час вимірювання створює умови, які значно відрізняються від випадку статичного вимірювання МРРТ. Іншим вагомим недоліком даного методу є залежність процедури вимірювання від характеристик приймача випромінювання.

Іншим методом, що є реальним конкурентом для характеристики ІЧ камер, є вимірювання порогу розпізнавання орієнтації трикутника (TOD) [14]. Даний метод пропонує використовувати серію трикутних тест-об'єктів для оцінки ІЧ систем зображення [5]. На рис. 1.6 представлено ІЧ зображення трикутного об'єкту, що використовується.

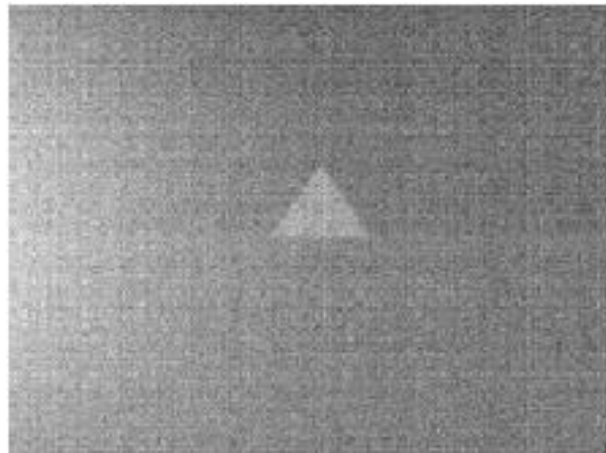


Рис. 1.6. ІЧ зображення трикутного об'єкту, що використовується в методі TOD

На рис. 1.7 зображені можливі варіанти орієнтації рівностороннього трикутника – тест-об'єкту методу TOD. На рис. 1.8 представлені зразки тест-об'єктів для методу TOD, впорядковані за розміром та контрастом.

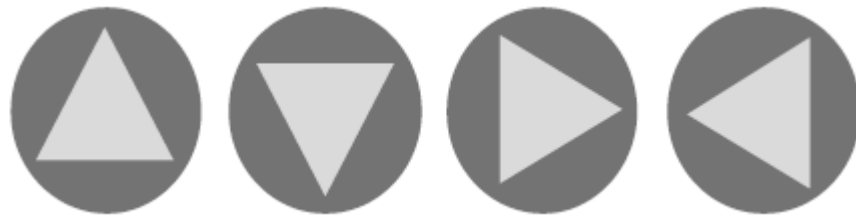


Рис. 1.7. Можливі варіанти орієнтації рівностороннього трикутника – тест-об'єкту методу TOD

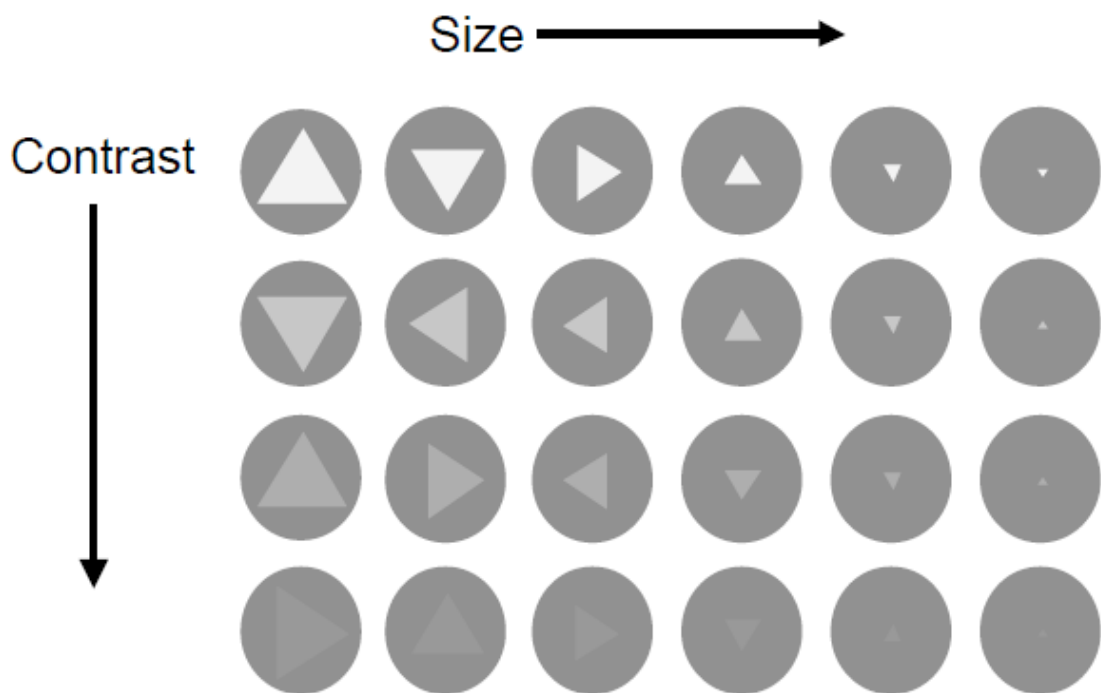


Рис. 1.8. Зразки тест-об'єктів для методу TOD, впорядковані за розміром та контрастом

Даний метод має ряд теоретичних та практичних переваг над методом оцінювання з використанням МРРТ. Він базується на використанні вдосконаленого тестового зразка та докладному визначенні задачі спостерігача, його результатом є більш точні дані, які простіше порівнювати. Також існує аналітичний зв'язок між результатами вимірювання TOD та характеристикою МРРТ. Проте з математичної точки зору алгоритм переходу є досить складним. TOD метод було винайдено через кілька десятиліть після введення вимірювання МРРТ, тому класичний метод контролю камер за їх

MPRT вже був включений до кількох поширених військових стандартів. Таким чином, ймовірність широкого визнання методу TOD міжнародними організаціями достатньо мала, незважаючи на потенційні переваги цього методу оцінки ІЧ приладів.

Параметр MPTC – мінімальна різниця температур сприйняття MTDP - Minimum Temperature Difference Perceived - новий показник якості для оцінки ІЧ камер з недостатньою вибіркою. MPTC – різниця температур, за якої спостерігач розділяє чотирьохштрихову міру при оптимальному фазовому положенні тест-об'єкта [5]. Завдяки використанню такого підходу можна аналізувати функціонування камери на частоті, яка перевищує частоту Найквіста, що дозволяє усунути значний недолік застосування MPRT. В той же час при вимірюванні MPTC використовується те ж саме обладнання та чотирьохштрихова міра. Крім того метод вимірювання MPTC використовувався у відомій моделі оцінювання тепловізійних камер. Розглянутий параметр має всі шанси стати основним показником якості ІЧ камер, якщо отримає підтримку міжнародного стандарту.

Проте на даний час найбільш надійним способом оцінки ІЧ камери залишається вимірювання MPRT з подальшим обчисленням максимальної дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації стандартного об'єкту (за стандартом НАТО). При цьому мається на увазі використання методики, запропонованої американським стандартом STANAG 4347 «Визначення номінальної статичної дальності дії ІЧ зображуючих систем, 1995» (STANAG 4347, Definition of nominal static range performance for thermal imaging systems, 1995). Даний стандарт однозначно визначає параметри стандартного об'єкту, стандартних атмосферних умов та пропонує спосіб обчислення значень дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації стандартного об'єкту на основі функції MPRT ІЧ камер, які контролюються.

Дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації стандартного об'єкту є потенційно хорошим критерієм оцінки ІЧ камер [32, 33]. Очевидно, що постановка вимог до ІЧ зображуючих систем у вигляді значень дальності

дії є зручним з практичної точки зору. Однак, більш розповсюдженими є вимоги у вигляді МРРТ.

Загалом існує біля сорока параметрів для оцінки ІЧ камер. Вимірювання такої кількості параметрів навіть для однієї камери не є рентабельним. На основі аналізу джерел літератури можна сказати, що для оцінювання МБК необхідні наступні параметри та характеристики: просторова роздільна здатність, температурна роздільна здатність, спектральні характеристики тощо [5].

МРРТ містить інформацію як про температурну чутливість камери, так і про їх просторову роздільну здатність. В той же час МРРТ є єдиним параметром ІЧ камер, представленим в декількох міжнародних стандартах [68]. Також існують компанії, які оцінюють камери тільки одним цим параметром. Проте для більш повної оцінки можна застосовувати функції МВРТ та ЕШРТ.

Велика кількість параметрів просторової роздільної здатності пов'язані з функцією ФПМ. Тому при оцінюванні ІЧ камер часто користуються також даним параметром [61].

1.4 Порівняльний аналіз технічних характеристик існуючих аналогів

В ДЗЗ основним параметром є спектральна енергетична яскравість. Для виділення ознак об'єктів земної поверхні звичайно використовується відношення яскравості в окремих ділянках спектру, характерних для певних типів об'єктів [19]. Велика кількість каналів в діапазоні 8 – 14 мкм дозволяє вирішити проблему визначення складу об'єктів земної поверхні за зміною коефіцієнта теплового випромінювання та підвищити точність вимірювання їх температур [12]. Тому більшість сучасних мікроболометричних камер містять від 3 до 6 спектральних каналів.

У відповідності з [60] ІЧ супутникові системи ДЗЗ повинні забезпечувати просторову роздільну здатність на поверхні Землі не більше,

ніж 30 - 50 м. Однак, виникають проблеми, пов'язані з технологічними обмеженнями при виготовленні фоточутливих ділянок ПВ розміром менше 17 мкм та з дифракційними обмеженнями оптичних систем.

Розміри типових мікроболометричних матриць для застосування в КА ДЗЗ становлять:

- 320 x 240 пікселів розміром порядку 25 – 50 мкм;
- 640 x 480 пікселів розміром порядку 25 мкм;
- 1024 x 1024 пікселів розміром порядку 19 мкм.

Також в літературі описано використання лінійок 1 x 512 пікселів розміром близько 40 мкм. Стандартні приймачі працюють на частоті кадрів 30 та 60 Гц, проте були розроблені і системи з частотою кадрів 100 Гц. Теплова постійна часу таких приймачів складає 4..14 мс.

Розглянемо вимоги до деяких із описаних вище параметрів камер, обумовлені необхідністю вирішення задач ДЗЗ [60, 49, 84, 74], зведені в табл. А.1 додатку А та технічні параметри космічних МБК для вирішення задач ДЗЗ [5, 77] представлені в табл. А.2 додатку А.

В багатьох камерах для виявлення високотемпературних об'єктів використовують дані каналів середнього та дальнього ІЧ діапазонів. Більшість МБК використовують вузькі спектральні канали з $\lambda \geq 10,5$ мкм, оскільки в діапазоні $\Delta\lambda=7,7...10,3$ мкм водяна пара в атмосфері та озон поглинають випромінювання.

Як видно з даних табл. А.1, температура поверхні Землі може складати 200 - 400 К, а при спостереженні вулканів і пожеж може досягати 1500 К. Необхідна точність визначення температури – 0,5 – 2 К. Мінімальна чутливість камер складає 0,1 - 1 К. При цьому просторова роздільна здатність камер на поверхні Землі для забезпечення рішення задач ДЗЗ коливається в величезному діапазоні 2 – 1000 м. При цьому, як свідчить табл. А.2, сучасні ІЧ камери здатні забезпечувати просторову роздільну здатність 200 – 1000 м. Менші значення просторової роздільної здатності відповідають нижчим висотам орбіти та меншим значенням смуги захоплення.

Оскільки роздільна здатність існуючих ІЧ камер не відповідає значенням, необхідним для рішення багатьох задач ДЗЗ, проблема підвищення роздільної здатності МБК є важливою та актуальною.

1.5 Методи підвищення роздільної здатності зображень

Однією з найважливіших задач ДЗЗ є підвищення якості зображень. Основним параметром якості зображення є його роздільна здатність. Даний параметр залежить від кількості пікселів, що складають це зображення. Для вирішення задач ДЗЗ необхідність забезпечення високої роздільної здатності (ВРЗ) супроводжується вимогою захвату якомога більшої ділянки поверхні. Однак зменшення розміру пікселів і збільшення їх кількості обмежено технологічними факторами і пов'язано зі складнощами функціонування і обробки сигналів.

Методи підвищення роздільної здатності зображень можна розділити на лінійні методи, нелінійні та субпіксельну обробку. Найпростішим методом підвищення роздільної здатності зображень є інтерполяція. При інтерполяції зображення представляється у вигляді функції, де пікселі зображення – точки, в яких значення функції відомі. Інтерполяція – це процес пошуку проміжних значень по дискретному набору відомих значень. Точне відновлення інформації шляхом інтерполяції є неможливим. Методи інтерполяції базуються на використанні згортки зображення і ядер різних типів.

При вирішенні задач підвищення роздільної здатності цифрових зображень потребується не побудова неперервного зображення, а перехід з грубої сітки на дрібнішу [59]. Такий процес називають ресамплінгом зображень, а відношення кроку грубої сітки до кроку дрібної – коефіцієнтом збільшення роздільної здатності зображення.

Найпростішим і найшвидшим лінійним методом інтерполяції є метод «найближчого сусіда», який полягає в розтягуванні пікселів. У випадку ресамплінга з цілим коефіцієнтом збільшення роздільної здатності цей метод

представляє собою просте повторювання пікселів зображення. Недоліком застосування даного методу є яскраво виражений «ефект сходинок», ілюстрований рис. 1.9.

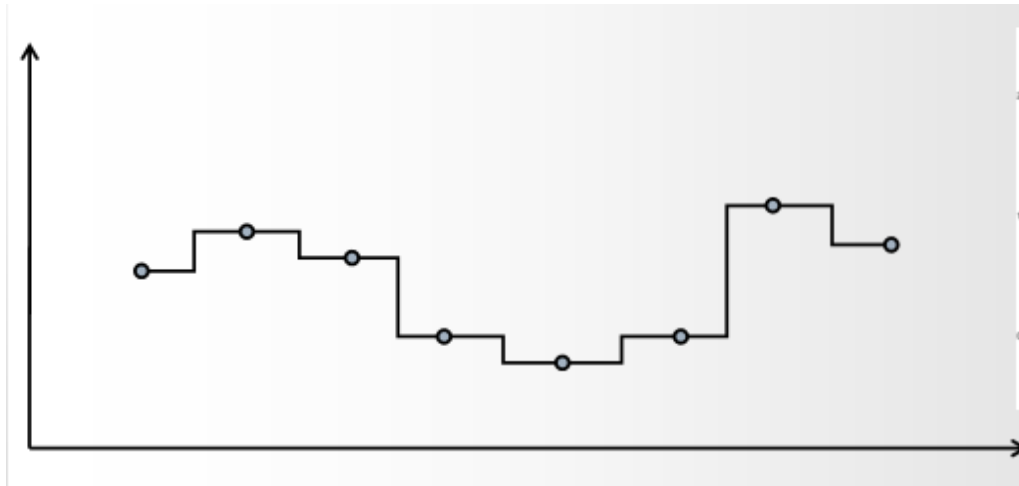


Рис. 1.9. Ефект сходинок

Відновлена функція стає більш гладкою, якщо замість сходинок з'єднувати точки прямими [59]. Таким чином здійснюється лінійна інтерполяція першого порядку (рис. 1.10).

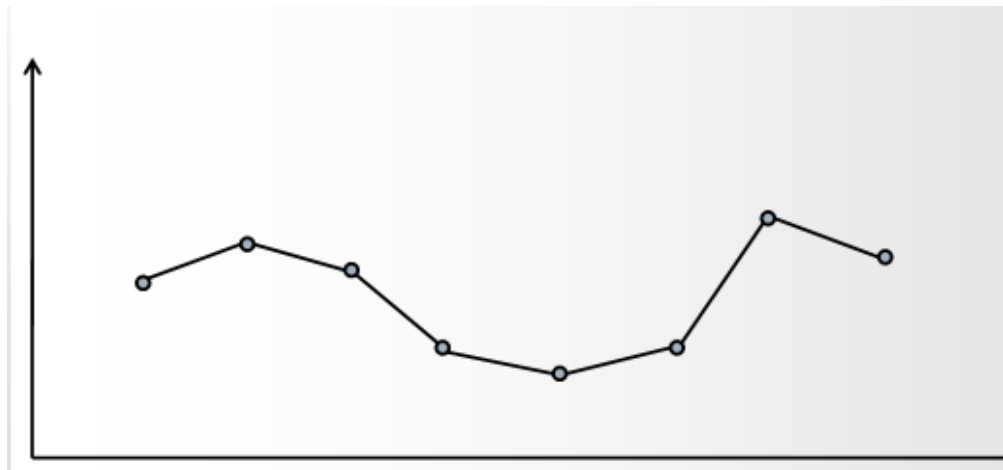


Рис. 1.10. Лінійна інтерполяція першого порядку

Білінійною називається лінійна інтерполяція першого порядку для двомірного випадку. В результаті застосування такого методу інтерполяції з'являються слабо виражені ефекти сходинки і розмиття зображення.

Також апроксимувати функцію можна за допомогою кубічних сплайнів. Даний метод набув широкого розповсюдження в програмах обробки зображень завдяки хорошему балансу між ефектами розмиття, аліасінгу та оконтурювання країв. В двомірному випадку метод називають бікубічною інтерполяцією. Крім того для інтерполяції використовують функцію Гауса та інші.

«Ідеальна» інтерполяція заснована на застосуванні теореми Котельникова.

На практиці застосування цього методу ускладнено, а в результаті спостерігається яскраво виражений ефект помилкового оконтурювання (ефект Гіббса).

Найбільш поширені негативні ефекти, що виникають при збільшенні роздільної здатності зображень, пов'язані зі спотворенням високочастотної інформації. Такими ефектами є розмиття, аліасінг (східчастість контурів) і ефект Гіббса [59]. Вплив даних ефектів на вигляд зображень представлено на рис. 1.11.



Рис. 1.11. Вплив розмиття (а), аліасінга (б) і помилкового оконтурювання (в) на зображення

При обробці зображень ефект Гібса проявляється як ефект помилкового оконтурювання у вигляді ореолів біля різких контурів. Відповідні перепади інтенсивності приведені на рис. 1.12.

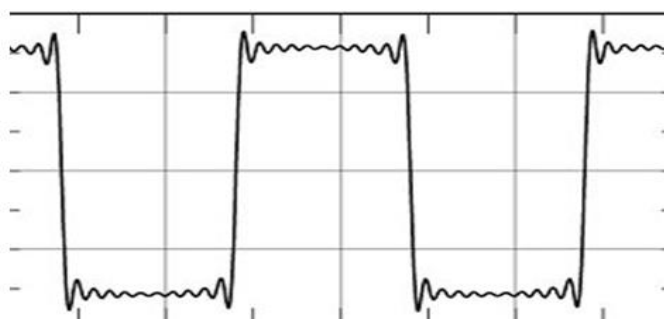


Рис. 1.12. Перепади інтенсивності, які створюють ефект Гібса на зображеннях

Результат будь-якого лінійного методу інтерполяції представляє собою баланс між даними трьома ефектами. Для придушення цих ефектів при підвищенні роздільної здатності зображень застосовуються методи їх постобробки.

Позбавитись від недоліків лінійних методів інтерполяції можна за допомогою адаптивних нелінійних методів, в яких ядро задається окремо для кожного пікселя і залежить від значень пікселів зображення, що інтерполюється. Прикладом нелінійних методів є клас градієнтних методів. Прикладом нелінійних методів є клас градієнтних методів. Градієнтні алгоритми дозволяють досягти кращих результатів при інтерполяції вздовж контурів деталей зображення шляхом використання різних ядер вздовж та поперек границь (наприклад, використання функції Гауса зі змінними радіусами в різних напрямках) [59]. В цілому результат виходить близьким до результату бікубічної інтерполяції, але ефект аліасінгу майже повністю пригнічується.

Інший метод, заснований на використанні градієнту – метод спотвореної відстані WADI (Warped Distance). При його застосуванні

значення пікселя, що інтерполюється, розраховується як зважена сума значень чотирьох найближчих пікселів, а вагові коефіцієнти вибираються в залежності від відстані до цих пікселів і модуля похідної в них (чим більше значення модуля похідної, тим менші вагові коефіцієнти). Алгоритм інтерполяції, спрямованої за контурами, NEDI (New Edge-Directed Interpolation) застосовується з метою збільшення зображення тільки в 2 рази і використовує припущення про подібність фрагментів зображення високої роздільної здатності і відповідних їм фрагментів низької роздільної здатності. Значення пікселів, що інтерполюються, є зваженою сумою значень чотирьох сусідніх пікселів. При цьому вагові коефіцієнти розраховуються, виходячи з припущення, що вихідне зображення отримувалося шляхом збільшення зменшеного в 2 рази зображення з тими ж значеннями вагових коефіцієнтів. Даний метод добре взаємодіє з контурами на зображенні. Близьким до нього є також клас фрактальних алгоритмів, в основі яких лежить властивість самоподібності цілих блоків зображення [59].

Якщо рух об'єкту відомий, то можна використовувати інформацію зі всіх кадрів для побудови одного зображення високої роздільної здатності (ВРЗ). Субпіксельною обробкою називають таку обробку, яка дозволяє синтезувати цифрове зображення ВРЗ з серії знімків низької роздільної здатності (НРЗ) [23]. В англійській літературі для визначення процесу отримання серії знімків разом із наступною субпіксельною обробкою використовують терміни «мікросканування» та «суперрозділення» («superresolution») [34].

На рис. 1.13 спрощено представлено найпростіший випадок мікросканування з використанням зміщення на відстань, рівну половині пікселя, по двом осям [34]. Інтерполяція та безпосередньо збільшення зображень – операції цифрової обробки зображень, які застосовуються для підвищення роздільної здатності, але не вносять додаткової інформації в зображення.

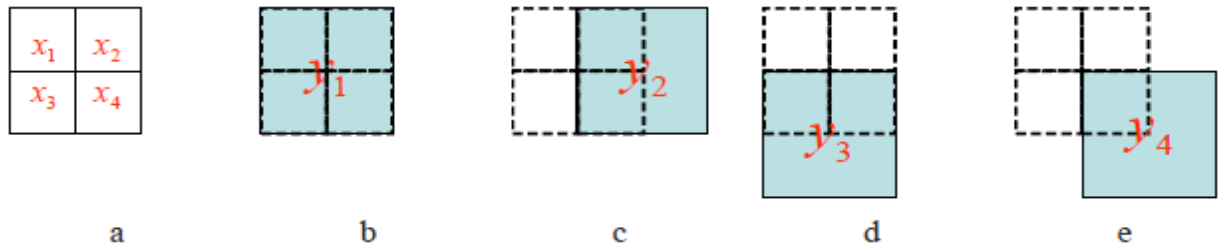


Рис. 1.13. Найпростіший випадок мікросканування: (а) зображення ВРЗ, яке складається з 4 пікселів; (b) – (e) зображення НРЗ, які складаються з одного пікселя, кожне з яких отримано із субпіксельним зміщенням камери

Субпіксельна обробка використовує дані відразу з декількох зображень, тому отримане в результаті зображення ВРЗ містить більше корисної інформації.

1.5.1 Найпростіша математична модель мікросканування

Мікросканування моделюється як обернена задача до задачі зменшення роздільної здатності, тобто ділянка поверхні оцінюється за серією знімків НРЗ. Таким чином, джерело інформації оцінюється за даними спостереження [10].

Розв'язання оберненої задачі в загальному випадку потребує побудови прямої моделі. Пряма модель є математичним описанням процесу переходу від зображення ВРЗ до набору спотворених зображень НРЗ.

В загальному вигляді вона представляє собою наступний вираз:

$$\vec{Y} = M\vec{X} + \vec{V},$$

де \vec{Y} – вектор вимірних значень,

\vec{X} – невідоме зображення ВРЗ (у вигляді вектору),

\vec{V} – вектор випадкового шуму системи,

M – матриця описання процесів, що впливають на якість зображення.

На практиці при розв'язанні задачі відновлення зображення ВРЗ, явно або неявно визначають функцію оцінки \vec{X} ітераційно [11].

В процесі моделювання вважається, що рух є рівномірно поступовим і розмивання просторово інваріантне, однак змінюється від кадру до кадру [9].

Значення пікселів кадрів НРЗ Y_k без врахування шуму можна представити в наступному вигляді [20]:

$$Y_k = M_k X = DHF_k, \quad k = 1..N \quad (1.3)$$

де DH - оператор зниження роздільної здатності. Цей оператор позначає послідовне застосування фільтру високих частот H , який є згорткою із фільтром Гауса, і оператору проріджування D . На рис. 1.14 приведена схематична ілюстрація цих процесів. При розв'язанні оберненої задачі відбувається пошук зображень ВРЗ X (двовимірна матриця інтенсивності пікселів) при відомих кадрах НРЗ Y_k і операторах руху F_k (відображення одного зображення на наступні, задають відповідність між точками першого і k -го кадру).

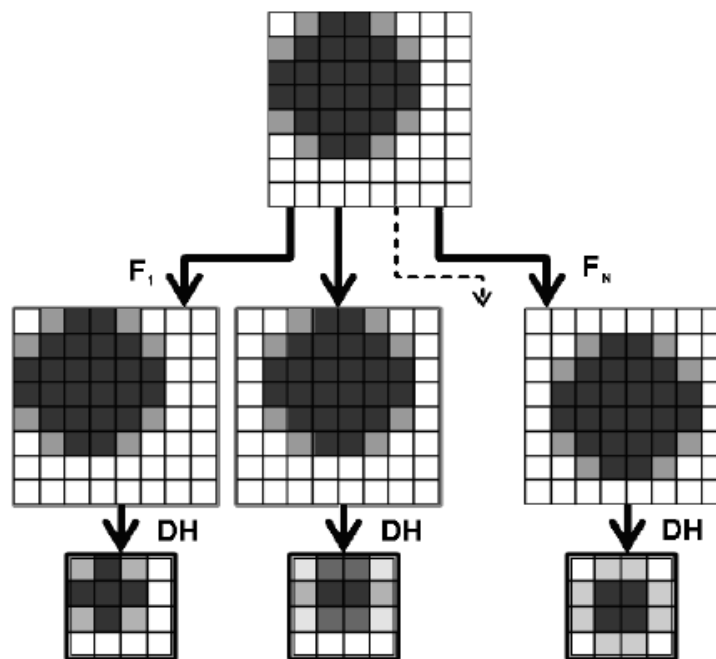


Рис. 1.14. Схема побудови кадрів НРЗ

На рис. 1.15 в якості прикладу представлено 4 кадри НРЗ і відновлений кадр ВРЗ.

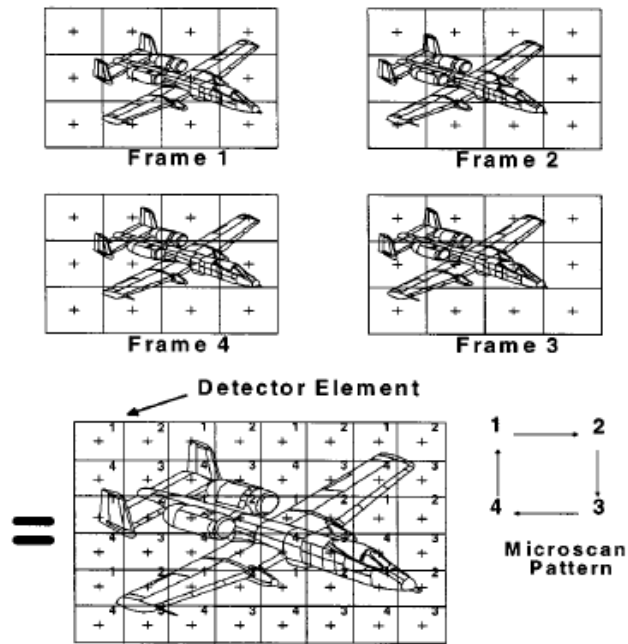


Рис. 1.15. Процес мікросканування

Для розв'язання поставленої задачі необхідно [23]:

- 1) побудувати пряму модель, яка описує всі компоненти системи та трансформацію сигналу в них;
- 2) вибрати належну первинну інформацію для переходу від математично некоректної задачі до математично коректної (регуляризація);
- 3) застосувати такий метод поєднання інформації з серії знімків НРЗ, який є обчислювально ефективним та стійким до похибок моделювання.

Через вплив атмосфери, руху супутника, електронної системи зчитування та інших факторів отримані зображення НРЗ в більшості випадків містять шумові складові, наявність яких ускладнює процес синтезу зображення ВРЗ. Тому алгоритм субпіксельної обробки містить різні типи фільтрації шумів. Алгоритм має бути стійким до різних джерел спотворення зображень. Проте більшість розроблених методів враховують вплив тільки одного типу шуму, і залишаються нестійкими до інших типів.

Пряма модель містить оператори, які описують перетворення зображення ВРЗ в серію зображень НРЗ. В загальному випадку вони враховують наступні фактори [25]:

- вплив атмосфери (розмитість зображення);
- вплив руху супутника;
- функцію розсіювання точки об'єктива камери;
- ефект проріджування (зниження роздільної здатності)
- адитивний шум

1.5.2 Методи відновлення зображення з високою роздільною здатністю

Методи субпіксельної обробки можна розділити на два основні типи: методи на основі навчання і методи на основі відновлення зображення [8]. Методи першого типу використовують одне зображення НРЗ та базу даних, що оновлюється, другого типу – декілька зображень НРЗ. Методи на основі навчання перспективні, однак не є універсальними і не застосовуються для обробки ІЧ космічних зображень.

Методи відновлення зображень ВРЗ при субпіксельній обробці орієнтовно можна розділити на декілька основних груп. Варто відмітити, що завдяки величезній кількості розроблених алгоритмів і методик суперрозділення границі між групами умовні.

- частотні методи (прості і обчислювально ефективні, однак чутливі до шумів і похибок моделювання);
- просторові методи;
- методи на основі регуляризації (можуть бути стохастичними або детерміністичними);
- методи на основі вейвлет-перетворень;

Просторові методи розрізняють не ітераційні (наприклад, метод максимальної правдоподібності) та ітераційні (метод оберненої проекції). В більшості випадків такі методи є обчислювально складними. Вони орієнтовані на наявність шуму Гауса на зображеннях, звичайно, не містять

регуляризації. Методи на основі вейвлет-перетворень корисні для швидкої інтерполяції при нерівномірній сітці вибірки.

Розглянуті вище методи вважають значення субпіксельних зміщень рівномірними і відомими заздалегідь. Бозе в [3] пристосував загальний рекурсивний алгоритм найменших квадратів для відновлення зображення ВРЗ з послідовності зображень НРЗ, отриманих мікроскануванням, із врахуванням похибок зміщення, що виникають при реєстрації зображень НРЗ. При цьому теорія була доповнена дисперсійним аналізом для досягання стійкості алгоритму. Також було показано, що за певних припущень зображення, що відновлюється за допомогою даного алгоритму, має мінімальне відхилення в порівнянні зі всіма оцінками без похибок зміщення. Інший підхід передбачає використання жорсткої моделі процесу реєстрації зображень замість поступальної моделі і наступне застосування ітераційного методу оберненої проєкції. Для зображень, отриманих камерою, була запропонована проєкційна модель для відновлення зображень ВРЗ. Також було запропоновано сімейство методів, заснованих на визначенні випуклих множин, що представляють собою жорсткі обмеження відновлюваного зображення. Методи на основі проєкції на випуклі множини (ПВМ) передбачають введення в процес відновлення первинної інформації про зображення ВРЗ. Спочатку такі методи не враховували розмивання зображення, проте згодом були вдосконалені. Втім наявність шумових складових в зображенні все ще було проблемою. Шляхом комбінації методів максимальної правдоподібності, максимального емпіричного і ПВМ в [15] була розроблена універсальна методика відновлення зображення ВРЗ з розмитих спотворених кадрів НРЗ із наявністю шумів. Для врахування відхилень субпіксельних зміщень, пов'язаних із похибками реєстрації зображень, при відновленні зображень ВРЗ використовувався загальний метод найменших квадратів з регуляризацією.

Мірою стійкості алгоритму відновлення зображення ВРЗ до викидів (тобто, точкових даних, характеристики розподілення яких відрізняються від прийнятої моделі) є точка відмови. Точка відмови – це найменший процент вмісту викидів, при якому значення оцінки вийде за межі визначеного діапазону. Якщо точка відмови має нульове значення, це означає, що навіть одного викиду достатньо, щоб змістити значення оцінки за передбачену межу. Найвищу величину точки відмови (50%) має метод субпіксельної обробки за серединним значенням [8].

В загальному випадку мета застосування методів субпіксельної обробки зводиться к задачі мінімізації відхилення відновленого зображення від реального. При цьому використовується мінімізація норми вектора L_p . Якщо значення p наближається до одиниці, в результаті обробки значення кожного пікселя є зваженим середнім значенням відповідних пікселів кадрів НРЗ, а значення вагових коефіцієнтів набагато вище біля серединного значення вимірювань. В той же час при наближенні p до 2, значення вагових коефіцієнтів будуть розподілені більш рівномірно [9], а значення пікселя буде середнім арифметичним значень, які відповідають відповідним пікселям кадрів НРЗ.

Широкий клас методів субпіксельної обробки представляють задачу підвищення роздільної здатності зображень як обернену задачу: побудувати таке зображення ВРЗ, яке після зменшення прийме вигляд відомого зображення НРЗ. Такий підхід дозволяє використовувати методи теорії розв'язання обернених задач. Так, збільшення зображення здійснюється шляхом розв'язання рівняння із застосуванням ітераційних методів. Обернена задача є некоректно поставленою через наявність декількох розв'язків системи. Одним із способів розв'язання некоректної задачі є застосування методів регуляризації. Регуляризація, використовуючи апріорну інформацію про зображення і додаткові обмеження, дозволяє звести некоректно поставлену задачу до коректно поставленої. В загальному

випадку при регуляризації задаються два функціонали: функціонал відповідності зображення ВРЗ зображенню НРЗ і функціонал відповідності зображення зображення ВРЗ апіорній інформації. Параметр регуляризації (тобто, коефіцієнт, який визначає ступінь дії регуляризації) контролює баланс між відповідністю зображенню НРЗ і апіорній інформації.

Субпіксельна обробка забезпечує мінімальні відхилення отриманих розв'язків, а елемент регуляризації – їх стабільність. Якщо значення параметру регуляризації вибране занадто великим, регуляризована система буде занадто відрізнятися від реальної, що призведе до розмивання зображення. В протилежному випадку система залишиться некоректною, а зображення буде зернистим.

Методи регуляризації визначаються:

- вибором норм простору і стабілізатора;
- вибором параметру регуляризації;
- вибором методу мінімізації функціоналів.

Елемент регуляризації компенсує недостатню інформацію загальними первинними даними. Певні типи функцій регуляризації ефективні для певних типів зображення.

Методи регуляризації поділяються на три групи [4]:

1. Методи низькочастотної фільтрації – засновані на припущенні, що реальний розв'язок системи рівнянь знаходиться на декількох низьких частотах, в той час, як енергія шуму розподілена рівномірно.
2. Ітераційні методи мають власні особливості. Деякі ітераційні методи можуть гірше сходитися при застосуванні до зображень із наявністю шумів (метод спряжених градієнтів). В цьому випадку необхідно вибирати положення для зупинки з метою мінімального впливу шуму.
3. Статистичні методи засновані на критерії максимальної ентропії і правилі Байєса. Вони застосовують статистичні моделі зображень, які спостерігаються, для прогнозування оцінок.

Одним з елементарних методів регуляризації є регуляризація Тихонова. Оскільки граничні пікселі та пікселі з наявністю шуму містять високочастотну інформацію, вони видаляються в процесі регуляризації Тихонова, і зображення не буде містити різких границь [2].

Одним з найбільш ефективних методів регуляризації для видалення шуму і розмивання – метод повної варіації (Total Variation - TV) [10]. Критерій повної варіації контролює загальну кількість змін в зображенні. Найбільш корисна властивість критерію повної варіації – зберігання границь об'єктів на зображенні, оскільки даний критерій не сильно впливає на різкі локальні градієнти (перепади інтенсивності).

Видалити шум із зображення, зберігаючи границі об'єктів, також дозволяє двонаправлений фільтр (Bilateral Filter) [9]. На відміну від традиційних фільтрів двонаправлений фільтр визначає близькість двох пікселів не тільки на основі геометричної відстані, але й фотометричної.

На основі методу повної варіації і двонаправленого фільтру було розроблено стійкий і обчислювально ефективний двонаправлений метод повної варіації (Bilateral Total Variation - BTV) [17]. Регуляризація такого типу була запропонована як надійна апроксимація двонаправленого методу повної варіації, запропонованого раніше. Такий метод регуляризації є узагальненням інших відомих методів регуляризації.

Проаналізуємо вплив кожного з методів регуляризації на піксель, оточений пікселями з відмінною інтенсивністю (рис. 1.16).

Метод повної варіації вважає його шумовим компонентом і використовує значення безпосередньо сусідніх елементів для оцінки вихідного значення. Двонаправлений метод повної варіації приймає до уваги більшу кількість сусідніх елементів і, переходячи через безпосередньо сусідні пікселі, також враховує величину аналогічних за значенням пікселів при оцінюванні значення пікселя. В такому випадку рівень розмивання набагато менший. На відміну від регуляризації за двонаправленим методом

повної варіації при збільшенні кількості ітерацій регуляризації іншими методами може з'явитися додаткове розмивання [30].

Приведемо приклад відновлення зображення ВРЗ на рис. 1.16. Для врахування особливостей обробки ІЧ зображень розглянемо один з восьми кадрів НРЗ (64×64 пікселя), отриманих тепловізійною камерою (отримані групою дослідників систем FLIR, лабораторія Врайта, Огайо, США) і відновлені різними методами зображення ВРЗ розміром 256×256 пікселів.

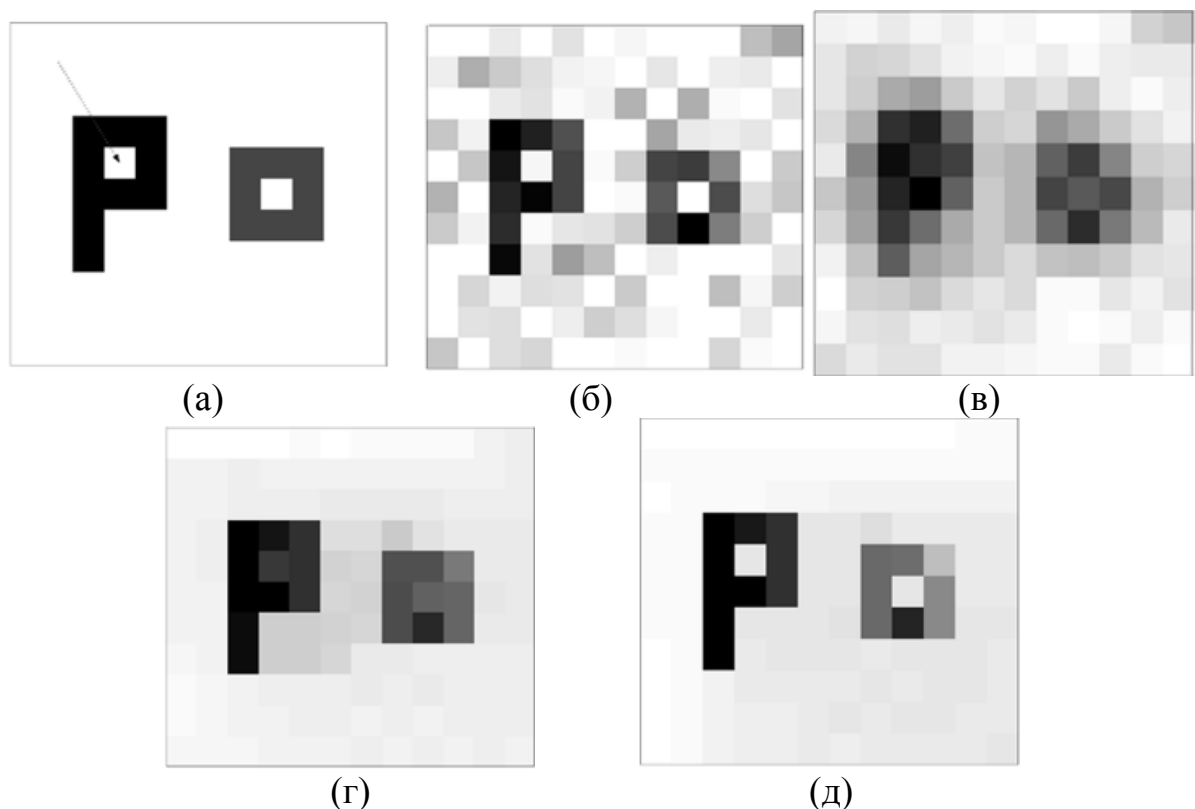


Рис. 1.16. Результати застосування різних методів регуляризації з метою відновлення зображення після додавання шуму:

- (a) – вихідне зображення;
- (б) – вихідне зображення з додаванням шуму Гауса із середнім значенням, рівним 0, та відхиленням, рівним 0,045;
- (в) – відновлення вихідного зображення з використанням регуляризації Тихонова;
- (г) – відновлення вихідного зображення з використанням регуляризації по методу повної варіації ($P = 1$, $\lambda = 0,009$);

(д) – відновлення вихідного зображення з використанням регуляризації по двонаправленому методу повної варіації

Приклади кадрів наведені на рис. 1.17. З рис. 1.17 б видно, що кубічна сплайн-інтерполяція покращує зорове сприйняття ІЧ зображення, але при цьому значно розмиває зображення.

Даний метод виявляється не ефективним, якщо виникає необхідність розрізняти дрібні об'єкти на зображенні [27].

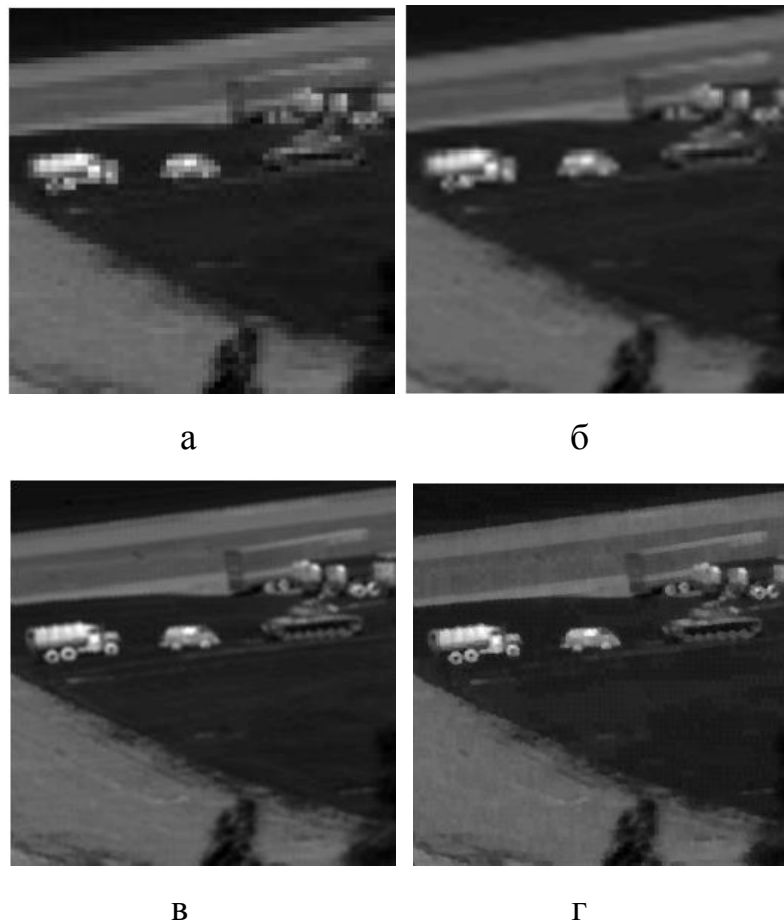


Рис. 1.17. Результати експериментальних досліджень [9]:

- (а) – один з 8 кадрів НРЗ;
- (б) – результат застосування кубічної сплайн-інтерполяції;
- (в) - результат застосування мінімізації норми L_2 і регуляризації Тихонова;
- (г) - результат застосування мінімізації норми L_1 і регуляризація по двонаправленому методу повної варіації

Значне покращення якості спостерігається на рис. 1.17 в, оскільки регуляризація Тихонова з оптимальним набором параметрів зменшує розмитість зображення. Застосування мінімізації норми L_1 і регуляризації за двонапрямленим методом повної варіації дає оптимальний ефект без згладжування контурів об'єктів (рис. 1.17 г).

Таким чином, мікросканування розширює можливості підвищення роздільної здатності, оскільки дозволяє додавати в результуюче зображення більше корисної інформації.

Отже аналіз областей застосування та призначення космічних МБК показав, що основні задачі ІЧ камер лежать в області метеорології, забезпечення контролю температури поверхні Землі та водних поверхонь, а також моніторингу пожеж і вулканів. Виявлено, що для забезпечення розв'язання поставлених задач отримані ІЧ знімки піддаються складній багаторівневій та багатоплановій цифровій обробці, що є причиною висування жорстких вимог до зображень, а, відповідно, і до технічних параметрів камер. В результаті огляду основних технічних характеристик та параметрів, які використовуються виробниками для оцінювання роботи ІЧ камер обґрунтовано, що первинними та найважливішими параметрами якості ІЧ камер є просторова та енергетична роздільна здатність. Основні узагальнені характеристики МБК дозволяють оцінити ці параметри. Порівняльний аналіз технічних характеристик існуючих МБК показав, що роздільна здатність існуючих ІЧ камер не відповідає значенням, необхідним для рішення багатьох задач ДЗЗ. Огляд методів підвищення просторової роздільної здатності виявив переваги застосування мікросканування, тобто реєстрації субпіксельно зміщених зображень з наступною програмною обробкою.

Висновки до розділу 1

1. На основі порівняльного аналізу існуючих мікроболометричних камер, областей їх застосування, основних технічних параметрів і характеристик обґрунтовано необхідність підвищення просторової роздільної здатності камери.
2. В результаті аналізу науково-технічної літератури обґрунтована мета дисертаційної роботи, яка полягає в підвищенні просторової роздільної здатності МБК для супутника без введення до приладу додаткових пристроїв шляхом обробки субпіксельно зміщених за рахунок власного руху носія знімальної апаратури зображень. Для досягнення мети потрібно вирішити наступні задачі:
 - 2.1 Дослідити узагальнену математичну модель мікроболометричної камери космічного базування, яка враховує параметри фону, об'єкту, оптичної системи та приймача випромінювання;
 - 2.2 Побудувати та дослідити математичну модель субпіксельної реєстрації зображень в МБК;
 - 2.3 Дослідити вплив застосування субпіксельної реєстрації зображень на просторову та енергетичну роздільну здатність МБК;
 - 2.4 Провести експериментальні дослідження процесу реєстрації субпіксельно зміщених зображень з метою підвищення просторової роздільної здатності камери.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МІКРОБОЛОМЕТРИЧНОЇ КАМЕРИ КОСМІЧНОГО БАЗУВАННЯ

2.1 Узагальнена математична модель мікроболометричної камери

2.1.1 Математична модель об'єкта спостереження

Метою математичного моделювання є заміна реальної оптико-електронної системи, дослідження якої викликає значні труднощі через її складність, сукупністю простіших елементів математичної моделі, допустимою для теоретичних досліджень [55].

Розглянемо перетворення сигналів в мікроболометричній камері на основі узагальненої схеми системи «об'єкт – атмосфера – МБК» (рис. 2.1). Випромінювання від об'єкта спостереження (власне та відбите) проходить через атмосферу і потрапляє до входної зіниці оптичної системи (ОС). ОС формує інфрачервоне зображення об'єкта і фону в площині ПВ. ПВ перетворює потік випромінювання в електричний відеосигнал. Після зчитування відеосигналу з пікселів матриці створюється одномірний електричний сигнал [57].

Для побудови математичної моделі МБК розглянемо спершу математичні моделі окремих складових системи «об'єкт – атмосфера – МБК». МБК фіксує власне теплове випромінювання тіл певної температури, що знаходяться в її полі зору. Температура і коефіцієнт випромінювання розподілені по поверхні об'єктів та фону, тому отримане випромінювання містить інформацію про об'єкт спостереження. Об'єкти і фон характеризуються просторовими, енергетичними і часовими параметрами [55]. Причому для об'єктів ці параметри описуються, як правило, детермінованими функціями, а для фонів – випадковими.

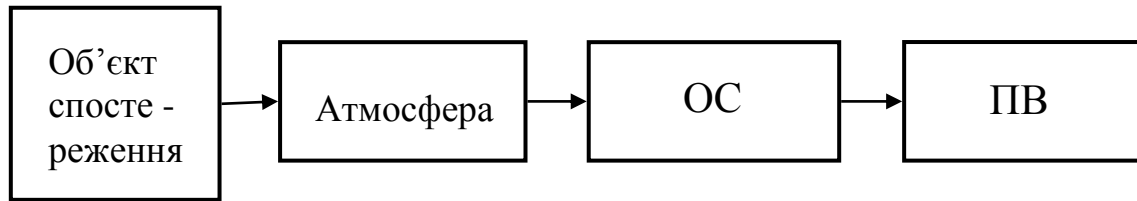


Рис. 2.1. Узагальнена схема системи «об'єкт – атмосфера – МБК»

Реальні об'єкти на поверхні Землі не є АЧТ, а поглинають лише частину падаючого на них випромінювання. Крім того, частина цього випромінювання відбивається та пропускається. Поглинаюча, пропускаюча та відбиваюча здатності тіл характеризуються відповідно спектральними коефіцієнтами поглинання $\alpha(\lambda)$, пропускання $\tau(\lambda)$ та відбиття $\rho(\lambda)$ [36].

Якщо тіло знаходиться у термодинамічній рівновазі, то згідно з законом збереження енергії поглинаюча енергія повинна дорівнювати енергії випромінювання тіла, тобто спектральний коефіцієнт поглинання дорівнює спектральному коефіцієнту випромінювання:

$$\alpha(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) = \frac{M_{\lambda t}(\lambda, T)}{M_{\lambda}(\lambda, T)},$$

де $M_{\lambda t}$, M_{λ} - спектральні енергетичні світності реального тіла і АЧТ.

Запишемо значення коефіцієнтів для різних випадків:

а) тіло непрозоре -

$$\tau(\lambda) = 0, \varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1;$$

б) непрозоре тіло добре відбиває випромінювання -

$$\tau(\lambda) = 0, \rho(\lambda) = 1, \varepsilon(\lambda) = 0;$$

в) тіло є абсолютно чорним -

$$\tau(\lambda)=0, \varepsilon(\lambda) = 1, \rho(\lambda) = 0;$$

г) тіло є *сірим* (коефіцієнти випромінювання і відбиття не залежать від довжини хвилі) -

$$\tau(\lambda)=0, \varepsilon(\lambda) = \varepsilon_0 < 1, \rho(\lambda) = \rho_0 < 1.$$

Залежно від джерела нагріву усі об'єкти земної поверхні можна розділити на дві групи. До першої групи належать об'єкти, які випромінюють за рахунок внутрішніх джерел теплоти. До них належать промислові споруди, автомобілі, пароплави, літаки, осередки вогню та ін. При спостереженні об'єктів цієї групи радіаційний контраст мало змінюється, оскільки вони мають значний температурний контраст [57]. Другу групу складають об'єкти, які нагріваються під дією сонячної радіації, потік якої змінюється протягом доби і року.

При енергетичних розрахунках оптико-електронних приладів (ОЕП), тобто при визначенні потоків або освітленості, які створюються випромінювачами на входній зіниці приладу, фотометричні характеристики джерел перешкод приймають цілком детермінованими і відповідними деяким стаціонарним моделям випромінювачів. Як основні фотометричні параметри приймаються: для точкових випромінювачів - сила випромінювання (сила світла), а для джерел, що мають скінченну випромінюючу площу, поверхнева щільність випромінювання або яскравість [37].

Можна розглянути моделі об'єктів спостереження в просторово-частотній площині. Найпростіше описуються об'єкти спостереження повністю аналогічні не випадковому детермінованому сигналу [50]. Наприклад, для опису точкових випромінювачів можна скористатися уявленням про двовимірну дельта-функцію [18].

$$\delta(x, y) = \begin{cases} \infty & \text{при } x = 0, y = 0 \\ 0 & \text{при } x \neq 0, y \neq 0 \end{cases}$$

або у векторній формі

$$\delta(\rho) = \begin{cases} \infty & \text{при } \rho = 0 \\ 0 & \text{при } \rho \neq 0 \end{cases}$$

спектр якої дорівнює одиниці, тобто є білим.

Набагато складніше отримати просторово-частотний спектр джерела з випадковою просторовою структурою, наприклад так званого строкатого фону, у якого яскравість змінюється за площею випадковим чином.

Статистична модель в цьому випадку залежить від характеру кореляційного зв'язку між яскравістю сусідніх ділянок. Для опису таких фонів використовуються багатовимірні закони розподілу. При різномірних структурах (наприклад, хмарність з розривами, ділянки горизонту) апроксимація одним законом (наприклад, законом Гауса) непридатна, оскільки кожна з макроструктур фону (хмарність і небо, ділянка неба і поверхня Землі і т. д.) має свій максимум щільності розподілення.

Фоновий шум представляється у вигляді довільної сукупності двовимірних імпульсів яскравості, розподіл амплітуд яких підкоряється закону Гауса:

$$p(L) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(L - m_L)^2}{2\sigma_L^2}\right]$$

а розподіл ширини — закону Пуассона:

$$p(r) = \frac{\exp(-r/m_r)}{m_r}$$

де L — енергетична яскравість певної точки на площині спостереження x, y ;

m_L — середнє значення L ;

σ_L^2 — дисперсія L ;

r — відстань між двома сусідніми даними точками в площині x, y ;

m_r — середнє значення r (середня ширина імпульсу).

Величини r і m_r часто беруться в кутовій мірі і мають розмірність радіан.

Якщо випадкові функції L та r не залежать одна від одної, то двовимірний кореляційний функція може бути представлена як

$$R(r) = \sigma_L^2 \exp(-r/m_r) + m_L^2$$

Двовимірний функція просторово-частотного спектру потужності фону, що є перетворенням Фур'є від $R(r)$

$$W(v_x, v_y) = \frac{2\pi\sigma_L^2/m_r}{(1/m_r^2 + v_x^2 + v_y^2)^{3/2}}$$

де v_x, v_y — складові вектора просторової частоти.

У загальному випадку поля яскравості більшості реальних фонів є нестационарними, тобто в різних їх ділянках змінюються значення математичного сподівання, дисперсії і ін. У літературі міститься мало відомостей про оцінку стаціонарності різних фонів [68].

Не менш важливою є і оцінка ергодичності фонів. При цьому часто велике значення має анізотропія фону (наприклад, витягнутість хмар в горизонтальному напрямі). Кількісних оцінок ергодичності і ізотропності реальних фонів у відомій літературі також вельми мало. В той же час, навіть при однакових радіусах кореляції і показниках анізотропії відмінність в моделях апроксимації фону веде до істотно різних оцінок ситуації перешкод (навіть за однакових умов освітлення і спостереження). Тому отримання достовірних статистичних даних по різноманітних природних фонах залишається вельми актуальним завданням [80].

Наведемо деякі статистичні властивості фонів типу неба [37], лісового і міського ландшафту в інфрачервоній області спектру. Типові значення дисперсій їх яскравості приведені в таблиці 2.1 [68].

Таблиця 2.1

Дисперсія яскравості фону

Спектральний діапазон, мкм	Небо		
	Часткова хмарність (день)	Часткова хмарність (ніч)	Ніч
2...3	10^5	—	—
3...4	10^3	—	—
4...5	$3,1 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^2$	80
8...14	$3,7 \cdot 10^6$	$3,7 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^3$

Можна відзначити, що ці значення різні для денних і нічних умов. Для природних фонів (ліс, небо) дисперсія істотно залежить від погодних умов в діапазоні 2-3 мкм, набагато слабкіше залежність в діапазоні 8...14 мкм. У діапазоні 2...3 мкм, де яскравість власного теплового випромінювання неба

(при температурі навколишнього середовища T близько 300 К) складає $10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$, а розсіяного сонячного випромінювання $5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$.

Розподіли амплітуд яскравості міського ландшафту і неба описуються законом Пуассона в області 8...14 мкм, де теплове випромінювання неба при $T=300 \text{ К}$ складає $10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$, а розсіяне сонячне випромінювання — $10^{-5} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$. Закон розподілу амплітуд є гаусовим. За законом Гауса розподілені також амплітуди яскравості ландшафту у всьому діапазоні 2..14 мкм.

Загальна модель розподілу вірогідності для амплітуд яскравості фонів в діапазоні 2...14 мкм, що описується сумою функцій щільності вірогідності для власного випромінювання (розподіл Пуассона) і для власного теплового випромінювання (розподіл Гауса) має наступний вигляд.

$$p(L) = \frac{1}{m_c \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{\sigma_L^2}{2m_c^2}\right) \exp\left(-\frac{L - m_L}{m_c}\right) \text{erfc}\left(\frac{\sigma_L^2}{2m_c^2} - \frac{L - m_L}{m_c \sigma_L \sqrt{2}}\right)$$

m_c і σ_c^2 — математичне сподівання і дисперсія яскравості фону, обумовленої розсіяним сонячним випромінюванням;

m_L і σ_L^2 — математичне сподівання і дисперсія яскравості фону, обумовленої власним тепловим випромінюванням

$$\text{erfc}(x) = \int_x^\infty \exp(-t^2) dt$$

— табличний інтеграл.

Одновимірні просторово-частотні спектри потужності (спектри Вінера-Хінчіна) неба, лісу та міського ландшафту приведені на рис. 2.2 [64]. Вони обернено пропорційні квадрату просторової частоти практично для будь-якого фону у всіх спектральних піддіапазонах в області 2...4 мкм і для різноманітних погодних умов.

Для фонових утворень з достатньо плавною зміною яскравості (наприклад, однорідних хмарних областей) можна використовувати кореляційну функцію і спектр потужності наступного вигляду:

$$R_L(\Delta r) = \sigma_L^2 \exp(-\Delta r^2 / r_\phi^2), \quad W(v_r) = \pi r_\phi^2 \sigma_\phi^2 \exp(-v_r^2 r_\phi^2 / 4)$$

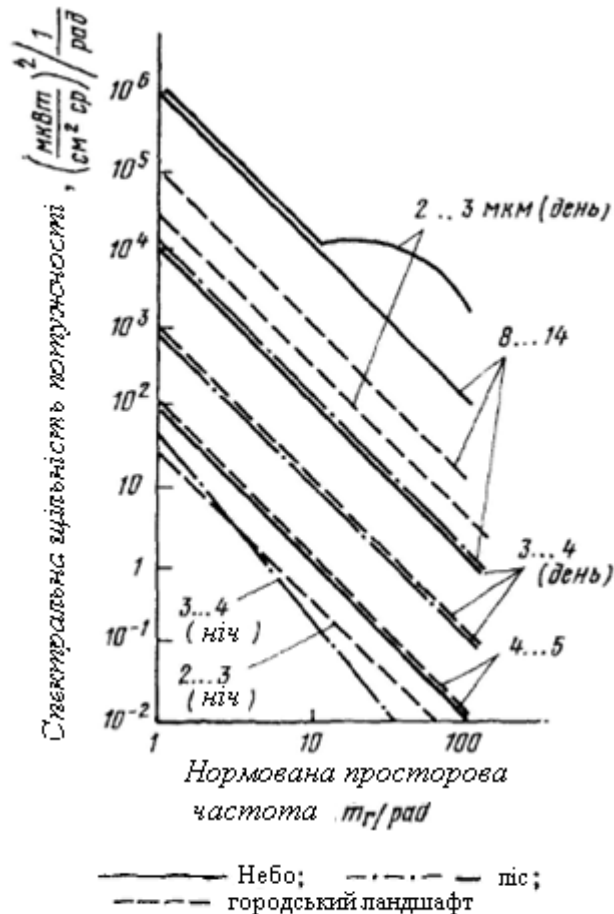


Рис. 2.2. Типові одновимірні спектри потужності випромінювання

При «евристичній» моделі випадкового фону розподіл яскравості по площині x, y має вид дошки для шах з випадковими розмірами сторін окремих осередків і двома можливими значеннями амплітуд: або L_1 , або L_2 . Відповідний цьому випадку спектр потужності має вигляд [64]

$$W(v_x, v_y) = 8x_\phi y_\phi \sigma_L^2 (1 + 2x_\phi^2 v_x^2)^{-1} (1 + 2y_\phi^2 v_y^2)^{-1}$$

Якщо закон розподілу протяжності неоднорідності фону по довільному напрямку має вигляд:

$$f(z) = 4z \cdot \exp(-2z)$$

то спектр фону по відповідній цій осі просторовій частоті має вигляд

$$W(v_z) = \frac{8(v_z^2 + 8)}{(v_z^4 + 64)}$$

Остання модель застосовується при малій вірогідності дуже короткій і дуже довгій неоднорідності.

Як правило, часові (і частотно-часові) характеристики моделей об'єктів спостереження приймаються стаціонарними, в межах порівняно невеликих проміжків часу, протягом яких працює МБК. Багато в чому часовий спектр випромінювання перешкод залежить від умов, в яких працює прилад, від його робочої смуги частот, виду модуляції і так далі. Часові флуктуації цих характеристик можуть бути спричинені такими чинниками, як зміна положення Сонця на небі, зміна хмарності тощо.

Характер радіаційних та температурних контрастів залежить від часу доби, метеоумов, джерела нагріву об'єктів.

Більшість об'єктів і елементів земної поверхні випромінюють відповідно закону Ламберта

$$M_e = \pi L_e, \quad (2.1)$$

де M_e та L_e – енергетична світність і яскравість поверхні відповідно. В такому випадку світність зручно визначати розподілом температури і спектрального коефіцієнта випромінювання $\varepsilon(\lambda)$. При цьому спектральна світність визначається функцією Планка $M_\lambda(\lambda, T)$

$$M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) M_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}}, \quad (2.2)$$

де $c_1 = 37415 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^4$, $c_2 = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ – постійні коефіцієнти; λ – довжина хвилі, мкм.

Для математичного моделювання земної поверхні як об'єкта спостереження МБК будемо вважати, що об'єкти на поверхні Землі випромінюють за законом Ламберта і є «сірими» тілами з постійними коефіцієнтами випромінювання ε_t та ε_b відповідно. Поверхні об'єктів спостереження мають постійну температуру T_t і T_b , яка мало змінюється за час формування кадру.

2.1.2 Математична модель пропускання атмосфери

Випромінювання від об'єктів послаблюється під час проходження через атмосферу, перш ніж потрапити до вхідної зіниці МБК. Одночасно з послабленням відбуваються також спотворення випромінювання, обумовлені градієнтом температури і турбулентністю, які пов'язані з неоднорідністю показника заломлення повітря. Крім того, атмосфера є джерелом власного випромінювання. Усі ці явища погіршують якість ІЧ зображення віддалених об'єктів [57].

В атмосфері існують спектральні області, де поглинання дуже мале, так звані вікна прозорості. Вікно прозорості 8...14 мкм співпадає з максимумом спектральної енергетичної світності тіл, нагрітих до природних температур, тому робочі спектральні діапазони МБК лежать в межах цього вікна прозорості.

При побудові математичної моделі атмосфери вважатимемо, що ослаблення випромінювання в атмосфері відбувається за законом Бугера-Ламберта

$$\tau_A(\lambda) = \exp[-\kappa_A(\lambda)R], \quad (2.3)$$

де $\kappa_A(\lambda)$ – спектральний показник ослаблення; R – довжина траси.

Тоді в робочому спектральному діапазоні $\lambda_2 - \lambda_1$ атмосфера характеризується середнім коефіцієнтом пропускання

$$\tau_A(R) = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) d\lambda. \quad (2.4)$$

Середній коефіцієнт пропускання безхмарної атмосфери при спостереженні земної поверхні із супутника для спектрального діапазону $\lambda_2 - \lambda_1 = 8 - 14$ мкм дорівнює $\tau_A = 0,75$ [52].

2.1.3 Математична модель ІЧ об'єктива

Оптична система МБК складається з інфрачервоного об'єктиву і набору спектральних фільтрів.

Об'єктив формує зображення в площині ПВ з необхідною просторовою роздільною здатністю і енергетичною роздільною здатністю. Фільтри забезпечують роботу МБК в заданому спектральному діапазоні [62].

Об'єктив має наступні характеристики:

- задня фокусна відстань $f'_o = 112,8$ мм;
- діафрагмове число $k_{eff} = 1$;
- кутове поле зору в просторі предметів $2\omega = 11^\circ 04'$.
- інтегральний коефіцієнт пропускання в діапазоні $\lambda_2 - \lambda_1 = 8 - 14$ мкм $\tau_o = 0,8$;
- діаметр кружка розсіювання $2r_o = 25$ мкм.

Сучасні камери для супутників зазнають дії широкого діапазону температур. Зміна температури спричиняє зміну параметрів оптичної системи: радіусів, товщини лінз, повітряних проміжків між елементами, показників заломлення матеріалів, що призводить до погіршення якості зображення. Для забезпечення формування об'єктивом якісного зображення в широкому діапазоні температур використовувався пасивний метод атермалізації, що полягав у забезпеченні компенсації зміни температур вибором оптичних матеріалів: кристалів типу германію, селеніда цинка та безкисневого скла.

В МБК використовуються п'ять змінних вузькосмугових інтерференційних фільтри, які формують на рівні $0,5\tau_{f,max}$ спектральні діапазони:

$$\lambda_{11} - \lambda_{21} = 8,0 - 13,5 \text{ мкм};$$

$$\lambda_{12} - \lambda_{22} = 8,0 - 10,5 \text{ мкм};$$

$$\lambda_{13} - \lambda_{23} = 10,5 - 11,5 \text{ мкм};$$

$$\lambda_{14} - \lambda_{24} = 11,5 - 12,5 \text{ мкм};$$

$$\lambda_{15} - \lambda_{25} = 12,5 - 13,5 \text{ мкм}.$$

Спектральний коефіцієнт пропускання для λ_{max} кожного піддіапазону не менше 0,8. При моделюванні фільтрів будемо вважати, що в межах кожного піддіапазону $\lambda_{1i} - \lambda_{2i}$ середній коефіцієнт пропускання фільтру $\tau_f = 0,8$.

Просторова роздільна здатність об'єктива визначається його МПФ $M_o(v_x, v_y)$, яка представляє собою модуль нормованого перетворення Фур'є від функції розсіювання точки.

Для дифракційно обмежених об'єктивів радіус кружка розсіювання дорівнює радіусу кружка Ері, який визначається формулою

$$r_E = 1,22\lambda \frac{f'_o}{D_p}, \quad (2.5)$$

де D_p – діаметр вхідної зіниці об'єктиву. При $f'_o : D_p = 1$ для $\lambda = 10$ мкм маємо діаметр кружка Ері 24,4 мкм. Тому об'єктив МБК є дифракційно обмеженим. МПФ такого об'єктиву визначається функцією [40]

$$M_o(v_x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} (\arccos x - x\sqrt{1-x^2}), & \text{когда } 0 \leq x \leq 1; \\ 0, & \text{когда } x > 1, \end{cases} \quad (2.6)$$

де $x = \lambda k_{eff} v_x$.

Оскільки використовувати функцію (2.6) для математичного моделювання МБК складно, її апроксимують лінійною функцією [55]

$$M_o(v_x) = \begin{cases} 1 - 1,218x, & \text{когда } 0 \leq x \leq 0,821; \\ 0, & \text{когда } x > 0,821. \end{cases} \quad (2.7)$$

2.1.4 Математична модель приймача випромінювання

В МБК використовується мікроболометрична матриця (МБМ) UL 03191. МБМ є тепловим ПВ, неселективним в робочому спектральному діапазоні, тобто його чутливість і питома виявлювальна здатність є постійними величинами [57]

$$R_D(\lambda) = R_{D,th} = \text{const}; D^*(\lambda) = D_{th}^* = \text{const}. \quad (2.8)$$

Відповідно до документації МБМ камери має наступні параметри:

- ЕШРТ $NETD_D = 50 \text{ mK}$;
- формат матриці $p_D \times q_D = 640 \times 480$;
- розмір пікселя $V_D \times W_D = 25 \times 25 \text{ мкм}^2$;
- частота кадрів $f_f = 60 \text{ Гц}$.

При цьому необхідно відмітити, що ЕШРТ, як параметр ПВ, пов'язаний з виявлювальною здатністю наступним чином [57]

$$NETD_D = \frac{4}{\sqrt{2A_D} t_i D_{th}^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_0)}{\partial T} d\lambda}, \quad (2.9)$$

де A_D – площа пікселя; $T_0 = 300 \text{ K}$ – температура, за якої визначаються паспортні характеристики приймача; t_i – час інтегрування, який змінюється в межах від 0 до $t_f = \frac{1}{f_f} = 0,02 \text{ с}$, де t_f – період кадрової розгортки.

Просторова МПФ приймача визначається структурою матриці, тобто розміром пікселя. Для пікселя прямокутної форми $V_D \times W_D$ МПФ має вигляд [41]

$$M_D(v_x, v_y) = \frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x} \frac{\sin(\pi W_D v_y)}{\pi W_D v_y}. \quad (2.10)$$

Формула (2.10) справедлива при умові, що розподіл чутливості в межах пікселя залишається постійним, а пікселі розміщені поряд один з одним. За теоремою Найквіста найбільша просторова частота, що може передаватися ПВ з дискретною структурою без спотворень дорівнює половині частоти

слідування пікселів. На частоті Найквіста $\nu_N = 1/2V_D$ амплітуда сигналу складає 64% від максимального значення на нульовій просторовій частоті.

2.1.5 Математична модель електронного блока обробки і передачі сигналу

Фотоприймальний пристрій МБК складається з МБМ і схеми зчитування. Схема зчитування містить комірки накопичення сигналу, попередні підсилювачі, схеми вибірки і зберігання сигналів під час зчитування тощо [55]. На виході мультиплексора спостерігається корисний сигнал, а також часовий та геометричний шумові сигнали. Геометричний шум обумовлений неоднорідністю параметрів пікселів МБМ і схеми зчитування.

В більшості випадків при математичному моделюванні електронний тракт розглядають як лінійну систему з МПФ $M_{El}(f)$, яку можна визначити як

$$M_{El}(f) = \frac{C_{El}(f)}{C_{El,max}}, \quad (2.11)$$

де $C_{El}(f)$ – коефіцієнт підсилення на частоті f ; $C_{El,max}$ – максимальне значення коефіцієнта підсилення.

Максимальна частота функції $M_{El}(f)$ визначається часом зчитування одного пікселя t_0 , тобто

$$f_{max} = \frac{1}{2t_0}. \quad (2.12)$$

Для апроксимації МПФ $M_{El}(f)$, яка описує низькочастотний фільтр використовують формулу:

$$M_{El}(f) = \left[1 + \left(\frac{f}{f_{3db}} \right)^{2n} \right]^{-0,5}, \quad (2.13)$$

де f_{3db} – частота, на якій амплітуда вихідного сигналу зменшується на 3db або в $\sqrt{2}$ раз; n – порядок фільтра.

На першій стадії проектування МБК вважають, що електронний тракт незначно спотворює сигнали, а його МПФ $M_{El}(f) \cong 1$ [57].

2.2 Критерії просторової і енергетичної роздільної здатності МБК

2.2.1 Просторова роздільна здатність МБК

В загальному випадку, лінійна роздільна здатність на поверхні Землі можна визначити як мінімальну відстань між двома точковими джерелами випромінювання на поверхні Землі з однаковою інтенсивністю, яка дозволяє спостерігати МБК їх окремо [55, 18].

Межа просторової роздільної здатності МБК визначається розмірами чутливої площадки $V_D \times W_D$ і фокусною відстанню об'єктива f'_o . Визначимо найменші значення кутів, які розділяються вздовж осей x та y відповідно:

$$\alpha_D = \frac{V_D}{f'_o}, \beta_D = \frac{W_D}{f'_o}. \quad (2.14)$$

Для більш повної оцінки просторової роздільної здатності об'єктива використовують його МПФ.

Аберації сучасних ІЧ об'єктивів обмежені дифракцією випромінювання на апертурі об'єктива. МПФ таких об'єктивів описують функцією (2.6). [1]. Максимальне значення просторової частоти в такому випадку визначають з рівняння $M_O(v_{x,cut}) = 0$. Розв'язком цього рівняння є

$$v_{x,cut} = \frac{1}{\lambda k_{eff}}. \quad (2.15)$$

Важливим параметром об'єктива є його роздільна здатність v_{res} , тобто здатність об'єктива створювати окремими зображення двох розташованих поряд точкових джерел випромінювання однакової інтенсивності. Просторова роздільна здатність визначається як величина, обернена до подвійної відстані між двома точками зображення, які формуються окремо.

Розглянемо класичні визначення просторової роздільної здатності [57]:

1. Критерій Релея, відповідно до якого дві точки спостерігаються окремо, якщо центр дифракційного зображення однієї точки співпадає з першим мінімумом дифракційного зображення другої точки. З цього критерія

впливає, що відстань між зображеннями двох точок, які спостерігаються окремо, дорівнює радіусу кружка Ері. Так, роздільна здатність об'єктива визначається за формулою

$$\nu_{res}^E = \frac{1}{2r_E} = \frac{1}{2,44\lambda} \frac{D_p}{f_o'} \quad (2.16)$$

2. Роздільна здатність, яка відповідає певній частці k_e концентрації енергії випромінювання всередині кола r_e в зображенні точкового джерела. Якщо розподіл освітленості в зображенні точкового джерела описується функцією $E'(r')$, то радіус r_e визначається з інтегрального рівняння

$$\frac{\int_0^{r_e} E'(r') r' dr'}{\int_0^{\infty} E'(r') r' dr'} = k_e \quad (2.17)$$

3. Роздільна здатність ν_{res}^c , яка відповідає зменшенню контрасту зображення до певної величини C_o . Якщо об'єktiv має одномірну МПФ $M_o(\nu_x)$, а тест-об'єкт має контраст, що дорівнює одиниці, то роздільна здатність визначається із рівняння

$$M_o(\nu_{res}^c) = C_o \quad (2.18)$$

Узагальнені характеристики МБК або критерії якості – це міра успішного виконання задач, які стоять перед камерою. До таких характеристик відносяться:

- 1) еквівалентна шуму різниця температур (ЕШРТ) *NETD* – Noise Equivalent Temperature Difference;
- 2) мінімальна виявлювальна різниця (МВРТ) *MDTD* – Minimum Detectable Temperature Difference;
- 3) мінімальна роздільна різниця температур (МРРТ) – *MRTD* – Minimum Resolution Temperature Difference.

2.2.2 Еквівалентна шуму різниця температур

ЕШРТ – це різниця температур між стандартним тест-об’єктом і фоном, які випромінюють як абсолютно чорне тіло (АЧТ), при якій відношення пікового сигналу на виході стандартного еталонного фільтра до шуму дорівнює одиниці.

Тест-об’єкт повинен мати кутові розміри, які в декілька разів перевищують кутові розміри пікселя МБМ $\alpha_D \times \beta_D$ для виключення можливості впливу просторової роздільної здатності МБК на ЕШРТ [46]. З метою уніфікації результатів розрахунків використовується стандартний еталонний фільтр з передавальною функцією

$$H_{f,tp}(f) = \left[1 + \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right]^{-0,5}, \quad (2.19)$$

де $f_0 = 1/2t_0$; t_0 – час зчитування одного пікселя.

Для розрахунку ЕШРТ використовуватимемо формулу [55]

$$NETD = \frac{4k_{eff}^2}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda)\tau_o(\lambda)\tau_f(\lambda)D^*(\lambda)\frac{\partial M_\lambda(\lambda,T)}{\partial T}d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}, \quad (2.20)$$

де k_{eff} – ефективне діафрагмове число; $\tau_A(\lambda)$, $\tau_o(\lambda)$, $\tau_f(\lambda)$ – спектральні коефіцієнти пропускання атмосфери, оптичної системи, фільтра відповідно; $D^*(\lambda)$ спектральна питома виявлювальна здатність ПВ; $M_\lambda(\lambda, T)$ – функція Планка; Δf – ефективна шумова смуга пропускання; A_D – площа пікселя МБМ; λ_1 – λ_2 – робочий спектральний діапазон роботи МБК.

2.2.3 Мінімальна виявлювальна різниця температур

МВРТ – це мінімальна різниця температур між тест-об’єктом і фоном, які випромінюють як АЧТ, необхідна для виявлення зображення тест-об’єкта при необмеженому часі спостереження і завчасно відомому його положенні на екрані. При визначенні МВРТ використовують тест-об’єкт, аналогічний тест-об’єкту для визначення ЕШРТ.

Для розрахунку MBPT будемо використовувати формулу [55]

$$MDTD(\xi_t) = \frac{NETD \cdot SNR_d}{\bar{L}_{s,n}} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{2 \xi_t^2 \Delta f \cdot t_o f_f t_E}}, \quad (2.21)$$

де $NETD$ – еквівалентна шуму різниця температур; SNR_d – відношення сигнал/шум в зображенні об’єкта на екрані дисплея, яке дозволяє виявити зображення об’єкта з заданою ймовірністю P_d ; $\bar{L}_{s,n}$ – нормоване розподілення яскравості зображення тест-об’єкта на екрані дисплея; ξ_t – кутовий розмір об’єкта спостереження; f_f – частота кадрів; $t_E = 0,2$ с – постійна часу ока.

2.2.4 Мінімальна роздільна різниця температур

MPPT – це мінімальна різниця ефективних температур між штрихами тест-об’єкта із заданою просторовою частотою і фоном, яка дозволяє візуально на екрані дисплея окремо спостерігати штрихи об’єкта. Тест-об’єкт – це чотирьохштрихова міра Фуко, в якій штрихи і проміжки між ними мають однакову ширину $\xi_{tp,x} = \omega_{tp}$, а їх висота дорівнює $7\omega_{tp}$. Штрихи і проміжки випромінюють як АЧТ. Просторова частота $\nu_x = 1/2\omega_{tp}$ може бути як в лінійних, так і в кутових величинах (найчастіше в мм^{-1} або мрад^{-1}).

Для розрахунку MPPT будемо використовувати формулу [55]

$$MRTD(\nu_x) = 0,66 \cdot SNR_r \cdot NETD \frac{\nu_x}{M_s(\nu_x)} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_o f_f t_E}}, \quad (2.22)$$

де SNR_r – відношення сигнал/шум в зображенні штрихової міри, яке забезпечує виявлення штрихів з заданою ймовірністю P_d ; $NETD$ – еквівалентна шуму різниця температур МБК; ν_x – просторова частота в мрад^{-1} ; $M_s(\nu_x)$ – модуляційна передавальна функція МБК; α_D, β_D – кутові розміри пікселя в мілірадіанах.

2.3 Методи визначення просторової і енергетичної роздільної здатності МБК

Приклад розрахунку ЕШРТ. Розрахунок ЕШРТ виконаємо по формулі (2.19), представивши її в спрощеному вигляді. При цьому по-перше необхідно врахувати інтегральні коефіцієнти атмосфери τ_A , ОС τ_o , фільтру τ_f . Крім того МБМ є тепловим ПВ, для якого згідно (2.8) $D^*(\lambda) = D_{th}^* = const$. Тоді формула (2.19) матиме наступний вигляд

$$NETD_i = \frac{4k_{eff}^2}{\tau_A \tau_o \tau_{fi} D_{th}^* \int_{\lambda_{1i}}^{\lambda_{2i}} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}, \quad (2.23)$$

де $i = 1, 2, 3, 4$ – номер фільтру.

В документації на мікроболометричні матриці замість питомої виявлювальної здатності D_{th}^* приводиться ЕШРТ приймача $NETD_D$. Даний параметр визначається формулою (2.9) для спектрального діапазона $\lambda_{10} - \lambda_{20} = 8 - 14$ мкм при температурі $T_0 = 300$ К.

З формули (2.9) визначаємо параметр D_{th}^* і після підстановки його в формулу (2.18) отримуємо

$$NETD_i = NETD_D \frac{k_{eff}^2 \sqrt{2t_i \Delta f}}{\tau_A \tau_o \tau_{fi} k_{\Delta\lambda, i}}, \quad (2.24)$$

де

$$k_{\Delta\lambda, i} = \frac{\int_{\lambda_{1i}}^{\lambda_{2i}} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}{\int_{\lambda_{10}}^{\lambda_{20}} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_0)}{\partial T} d\lambda} \quad (2.25)$$

– коефіцієнт використання спектрального діапазону.

За допомогою програмного забезпечення MathCAD, використовуючи функцію Планка (2.2), було розраховано значення коефіцієнта $k_{\Delta\lambda, i}$ для спектральних діапазонів пропускання фільтрів, при температурі фону 300 К и 288 К. Результати розрахунків представлені в таблиці 2.2.

Якщо час інтегрування дорівнює періоду кадрової розгортки $t_i = 1/f_f$, тоді $2t_i \Delta f = 1$.

Таблиця 2.2

Коефіцієнт використання спектрального діапазону $k_{\Delta\lambda,i}$

Температ. фону, К	Спектральний діапазон, мкм				
	8 – 13,5	8 – 10,5	10,5 – 11,5	11,5 – 12,5	12,5 – 13,5
300	0,945	0.508	0,168	0,145	0,124
288	0,841	0.442	0,151	0,133	0,114

Після підстановки вихідних параметрів в формулу (2.19) отримуємо

$$NETD_i = 0,1 \frac{1}{0,75 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot k_{\Delta\lambda,i}} = \frac{0,208}{k_{\Delta\lambda,i}}. \quad (2.26)$$

Розраховуємо ЕШРТ для різних спектральних діапазонів, використовуючи значення коефіцієнту $k_{\Delta\lambda,i}$ з таблиці 2.2. Результати розрахунків ЕШРТ МБК представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Еквівалентна шуму різниця температур МБК при значенні ЕШРТ приймача
50 мК, К

Температ. фону, К	Спектральний діапазон, мкм				
	8 – 13,5	8 – 10,5	10,5 – 11,5	11,5 – 12,5	12,5 – 13,5
300	0,110	0,205	0,619	0,717	0,841
288	0,124	0,236	0,688	0,786	0,910

Приклад розрахунку МВРТ. Розрахунок МВРТ виконаємо за формулою (2.16). Вихідними даними є ЕШРТ $NETD_i$ (табл. 2.2), частота кадрів $f_f = 60$ Гц і постійна часу зорового аналізатора $t_E = 0,2$ с. Визначимо значення інших параметрів, що входять до формули (2.16).

Типове відношення сигнал/шум $SNR_d = 4,3$ вибираємо з таблиці 3.22 [35] для порогового відношення $SNR_{th} = 3$ і ймовірності виявлення $P_d = 0,9$. Кутові розміри пікселя МБК дорівнюють

$$\alpha_D = \beta_D = \frac{v_D}{f'_0} = \frac{25}{112,8} = 0,222 \text{ мрад.}$$

Кутовий розмір об'єкта спостереження ξ_t визначається лінійними розмірами об'єкта V_t (200 м і 500 м) і висотою польота супутника $h_f = 668$ км

$$\xi_{t1} = \frac{V_t}{h_f} = \frac{200}{668} = 0,299 \text{ мрад; } \xi_{t2} = \frac{V_t}{h_f} = \frac{500}{668} = 0,749 \text{ мрад.}$$

Нормоване значення яскравості зображення об'єкта визначаємо з таблиці 4.1 [1]. Для цього необхідно визначити радіус кружка розсіювання МБК r_s . Визначимо радіус r_s з апроксимації модуляційної передавальної функції МБК гаусовою функцією [57]

$$M_{s,a}(v_x) = \exp(-2\pi^2 r_s^2 v_x^2). \quad (2.27)$$

МПФ камери визначається, в основному, МПФ об'єктива $M_o(v_x)$ і МПФ приймача $M_D(v_x)$.

Оскільки кружок розсіювання об'єктива $2r_o = 12,5$, об'єктив є дифракційно обмеженим. МПФ такого об'єктива описується функцією (2.6), яку представимо у вигляді

$$M_o(v_x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left(\arccos \frac{v_x}{v_m} - \frac{v_x}{v_m} \sqrt{1 - \left(\frac{v_x}{v_m} \right)^2} \right), & \text{когда } 0 \leq v_x \leq v_m; \\ 0, & \text{когда } v_x > v_m, \end{cases} \quad (2.28)$$

де $v_m = \frac{D_p}{\lambda} = \frac{112,8}{11} = 10,3 \text{ мрад}^{-1}$ – гранична кутова просторова частота.

МПФ (2.25) апроксимуємо лінійною функцією (2.7)

$$M_o(v_x) = \begin{cases} 1 - 1,218 \frac{v_x}{v_m}, & \text{когда } 0 \leq v_x \leq 0,821 v_m; \\ 0, & \text{когда } x > 0,821 v_m. \end{cases} \quad (2.29)$$

Модуляційна передавальна функція ПВ визначається кутовим розміром пікселя $\alpha_D = 0,222$ мрад і згідно (2.10) в одномірному випадку має вигляд

$$M_D(v_x) = \frac{\sin(\pi \alpha_D v_x)}{\pi \alpha_D v_x}. \quad (2.30)$$

Якщо вважати МБК лінійною інваріантною системою, то її МПФ визначається добутком МПФ об'єктива и ПВ

$$M_s(v_x) = M_o(v_x)M_D(v_x) = \left(1 - 1,218 \frac{v_x}{v_m}\right) \frac{\sin(\pi \alpha_D v_x)}{\pi \alpha_D v_x}. \quad (2.31)$$

На рис. 2.3 представлені графіки функції (2.30) і її апроксимація функцією (2.31) за умови

$$M_s(v_{x0}) = M_{s,a}(v_x) = 0,5. \quad (2.32)$$

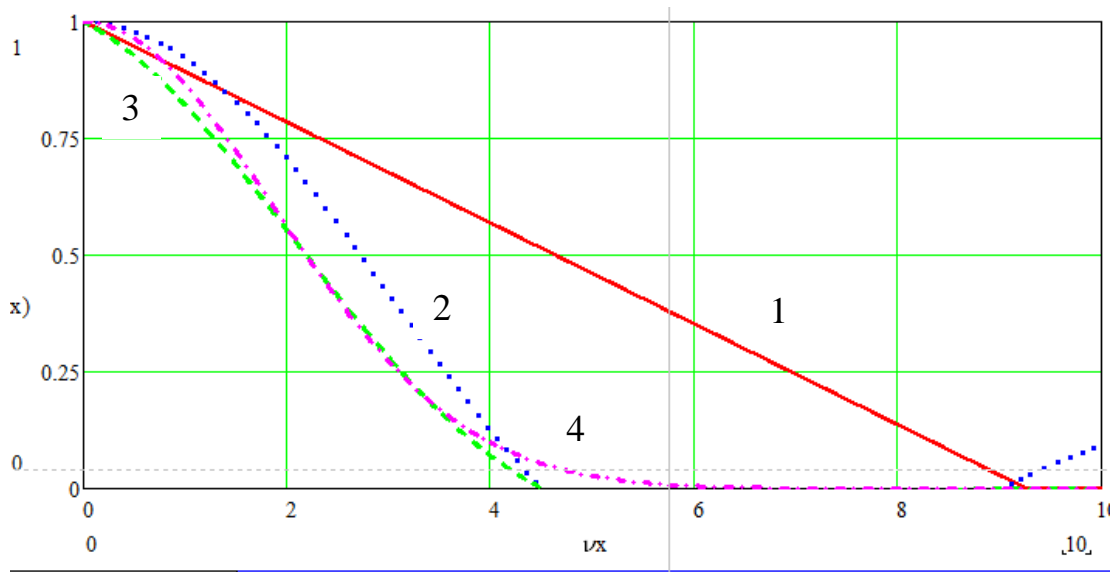


Рис. 2.3. Графіки залежності модуляційної передавальної функції від просторової частоти:

1 – об'єктива; 2 – приймача; 3 – сканера; 4 – апроксимація МПФ камери функцією (2.25)

Розв'язавши систему рівнянь (2.28), отримуємо

$$\left(1 - 1,218 \frac{v_{x0}}{11,3}\right) \frac{\sin(\pi 0,222 v_{x0})}{\pi 0,222 v_{x0}} = \frac{1}{2} \quad (2.33)$$

знаходимо значення просторової частоти $v_{x0} = 2,19$ мрад⁻¹.

З рівняння $M_{s,a}(v_x) = \exp(-2\pi^2 r_s^2 v_{x0}^2) = 0,5$ маємо $2\pi^2 r_s^2 v_{x0}^2 = \ln 2$. Звідки

$$r_s = \sqrt{\frac{\ln 2}{2}} \frac{1}{\pi v_{x0}} = 0,086 \text{ мрад}. \quad (2.34)$$

Визначаємо відносні кутові розміри об'єктів спостереження

$$\frac{\xi_{t1}}{r_s} = \frac{0,299}{0,088} = 3,4; \quad \frac{\xi_{t2}}{r_s} = \frac{0,75}{0,088} = 8,5. \quad (2.35)$$

З табл. 4.1 [57] знаходимо $\bar{L}_{s,n1}(3,4) = 0,29$ і $\bar{L}_{s,n2}(8,5) = 0,54$.

Ефективна шумова смуга визначається часом зчитування сигналу одного пікселя з умови $2\Delta f \cdot t_o = 1$. Підставивши всі параметри в формулу (2.16), отримаємо:

$$MDTD_i(\xi_{t1}) = NETD_i \frac{4,3}{0,29} \sqrt{\frac{0,222 \cdot 0,222}{0,3^2 \cdot 60 \cdot 0,2}} = 3,2 \cdot NETD_i; \quad (2.36)$$

$$MDTD_i(\xi_{t2}) = NETD_i \frac{4,3}{0,54} \sqrt{\frac{0,222 \cdot 0,222}{0,75^2 \cdot 60 \cdot 0,2}} = 0,7 \cdot NETD_i. \quad (2.37)$$

Використовуючи значення ЕШРТ камери з таблиці 2.2, розраховуємо значення МВРТ при температурі фону $T_b = 300$ К для різних спектральних діапазонів. Результати розрахунку МВРТ представлені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Мінімальна виявлювальна різниця температур МБК
(ЕШРТ приймача 50 мК), К

Розмір об'єкта, м	Спектральний діапазон, мкм				
	8 – 13,5	8 – 13,5	10,5 – 11,5	11,5 – 12,5	12,5 – 13,5
25 мкм, $T_b = 300$ К					
200	0,267	0,656	1,982	2,295	2,691
500	0,058	0,144	0,434	0,502	0,589
25 мкм, $T_b = 288$ К					
200	0,299	0,754	2,200	2,514	2,913
500	0,065	0,165	0,481	0,550	0,637

Приклад розрахунку МРРТ. Розрахунок МРРТ виконується за формулою (2.17). Відомими параметрами в рівнянні (2.17) є: $NETD$ (див. таблицю 2.3); $\alpha_D = \beta_D = 0,3$ мрад; $t_E = 0,2$ с $\Delta f \cdot t_o = 0,5$; $f_f = 50$ Гц;

$SNR_r = 4,3$ для ймовірності виявлення штрихів $P_d = 90 \%$. МПФ камери моделюється функцією (2.25) або її апроксимацією (2.23).

Підставивши всі вказані параметри в формулу (2.25), отримаємо:

$$\begin{aligned} MRTD(v_x) &= 0,66 \cdot 4,3 \cdot NETD \frac{v_x}{\exp(-2\pi^2 0,088^2 v_x^2)} \sqrt{\frac{0,222 \cdot 0,222}{0,5 \cdot 60 \cdot 0,2}} = \\ &= 0,257 NETD \cdot v_x \cdot \exp(0,15 v_x^2). \end{aligned} \quad (2.38)$$

На рис. 2.4 представлено графік функції $MRTD(v_x)$ камери для спектрального діапазону $\lambda_1 - \lambda_2 = 8 - 13,5$ мкм.

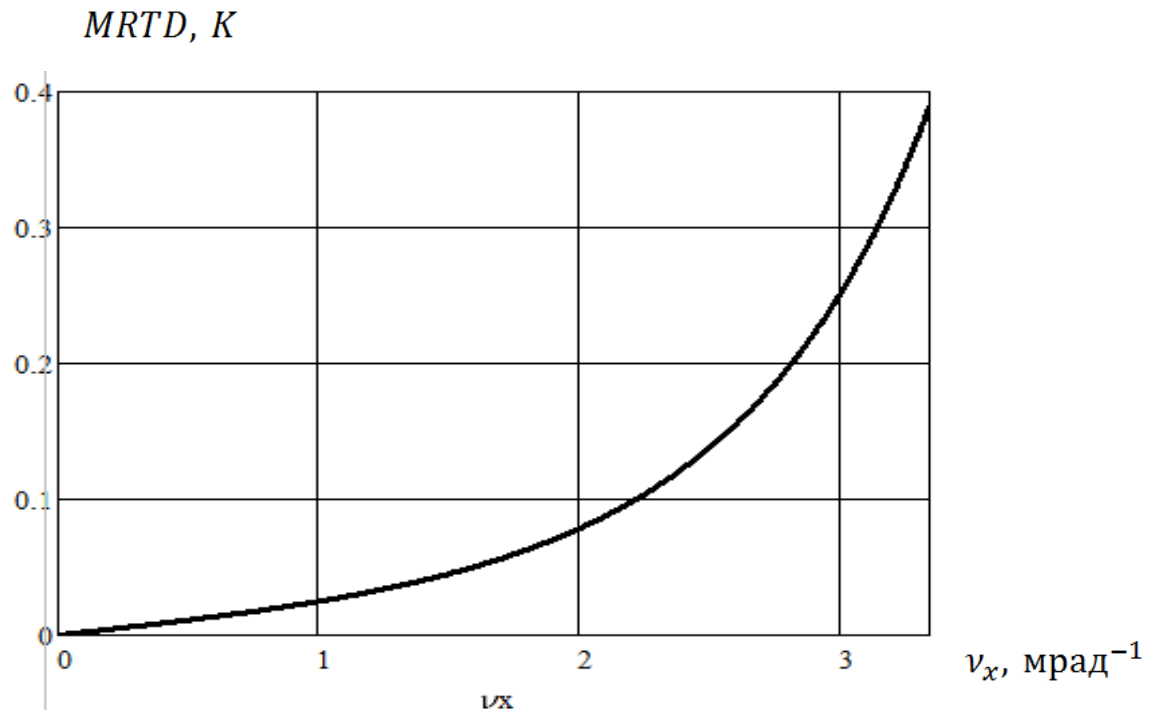


Рис. 2.4. Графік залежності мінімальної роздільної різниці температур МБК від просторової частоти для спектрального діапазону 8 – 13,5 мкм

Температурна роздільна здатність МБК визначається ЕШРТ, яка розраховується за формулою (2.15). Аналіз цієї формули показує, що є декілька шляхів зменшення параметру ЕШРТ камери.

1. Використання об'єктивів з малим діафрагмовим числом $k_{eff} = f'_o/D_p$ і коефіцієнтом пропускання τ_o . Це найбільш ефективний спосіб, оскільки

$NETD \sim k_{eff}^2$. На рис. 2.5 приведено графік залежності ЕШРТ від відносного отвору об'єктива.

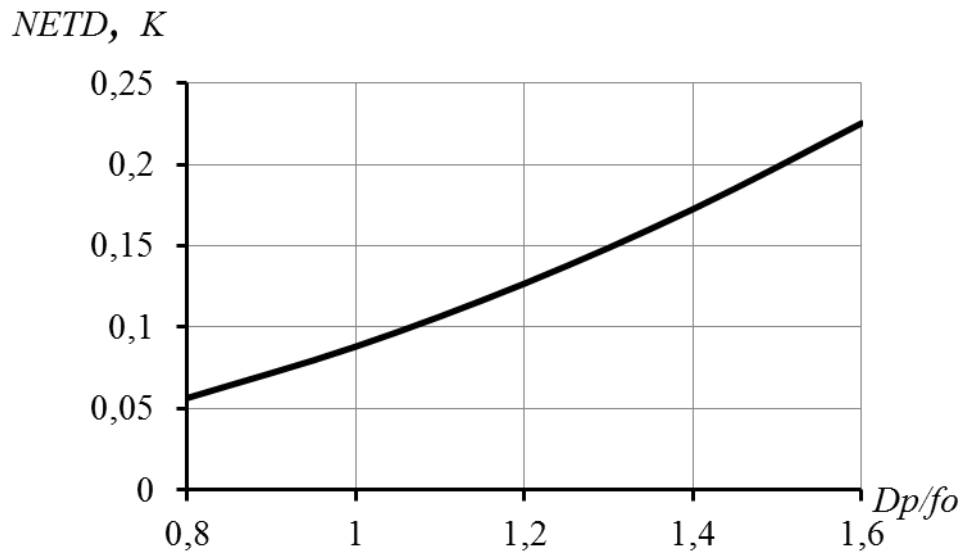


Рис. 2.5. Залежність еквівалентної шуму різниці температур $NETD$ від відносного отвору об'єктива D_p/f_o' для спектрального діапазону

$$\lambda_{14} - \lambda_{24} = 8,0 - 13,5 \text{ мкм}$$

2. Використання ПВ з високою питомою виявлювальною здатністю $D^*(\lambda)$ або ПВ з низьким значенням параметру $NETD_D$. З відношення (2.19) випливає, що ЕШРТ лінійно залежить від $NETD_D$.
3. Зменшення ефективної шумової смуги Δf електронного тракту. Проте для отримання високої просторової роздільної здатності ефективну шумову смугу необхідно збільшувати. Тому Δf вибирають з умови досягнення компромісу між просторовою і температурною роздільною здатністю. Смугу пропускання можна зменшити за рахунок зменшення частоти кадрів оскільки $\Delta f \propto f_f$. Використовуючи формулу (2.15) встановимо залежність.

$$NETD(f_f) = NETD(f_{f0}) \sqrt{\frac{f_f}{f_{f0}}}, \quad (2.39)$$

де $f_{f0} = 60$ Гц – частота, при якій визначався параметр приймача $NETD_D$.

4. З формули (2.15) також випливає, що $NETD \sim 1/\sqrt{A_D}$, тобто збільшення площі пікселя призводить до зменшення ЕШРТ. При цьому кутова просторова роздільна здатність камери $\delta\omega_s \sim V_t \sim \sqrt{A_D}$. Тому площу пікселя, яка головним чином визначає просторову роздільну здатність, вибирають мінімальною. Як правило, вона обмежена дифракцією світла в об'єктиві і для спектрального діапазону 8 – 14 мкм складає 25×25 мкм². Просторову роздільну здатність МБК можна покращити, використовуючи мікроболометричну матрицю з меншим розміром пікселя. Проте об'єктив МБК дифракційно обмежений і узгоджений з розміром пікселя 25×25 мкм² ПВ.

Керувати ЕШРТ камери можна за рахунок зміни часу інтегрування t_i . З формул (2.9) и (2.15) визначимо залежність ЕШРТ від часу інтегрування

$$NETD(t_i) = NETD(1/f_f) \sqrt{\frac{1}{t_i f_f}}. \quad (2.40)$$

МВРТ, що визначається формулою (2.16), і МРРТ, що визначається формулою (2.17), лінійно залежать від ЕШРТ. Тому зменшення ЕШРТ зменшує і значення МВРТ и МРРТ.

Крім того, МВРТ і МРРТ залежать від просторової роздільної здатності МБК, яка задається нормованим розподілом яскравості тест-об'єкта $\bar{L}_{s,n}$ на екрані дисплея і модуляційною передавальною функцією камери $M_s(\nu_x)$. Ці функції визначаються, головним чином, абераціями об'єктива і розмірами пікселя мікроболометричної матриці, які при виборі були узгоджені (радіус кружка Ері дифракційно обмеженого об'єктива 12,2 мкм та розмір пікселя мікроболометричної матриці 25×25 мкм²).

Таким чином, покращити характеристики МБК можна за рахунок використання приймача с $NETD < 50$ mK або зменшення частоти кадрів. Проте збільшення періоду кадрової розгортки призводить до змазування зображення за рахунок руху супутника, що негативно впливає на якість зображення.

2.4 Зменшення впливу геометричного шуму на якість зображення

Матричні приймачі випромінювання мають в більшості випадків досить складну схему зчитування навіть при відсутності корекцій чи обробки сигналів, отже крім шумів приймача спостерігаються шуми схеми зчитування, які призводять до ще більшого спотворення сигналів [81]. Для всіх типів матричних багатoelementних приймачів важливе значення має рівень геометричного шуму, що описує інваріантну у часі просторову неоднорідність параметрів пікселів. Звичайно джерелом геометричного шуму є розкид параметрів окремих пікселів МБМ і фотоприймальних пристроїв (чутливості, шуму, коефіцієнтів посилення підсилювачів та ін.), а також нелінійність їх характеристик перетворення.

Нелінійність характеристик перетворення, в свою чергу, зумовлена рядом причин:

- нелінійним характером енергетичних і фонових характеристик приймачів випромінювання
- залежністю чутливості приймача від довжини хвилі випромінювання, та пов'язаною із нею зміною енергетичних і фонових характеристик приймача
- селективним характером пропускання оптичної системи МБК,
- зміною температури охолодження приймача в процесі його роботи, якщо це змінює вид його спектральної характеристики
- нелінійністю перетворення сигналів в електронному тракті попереднього підсилення і аналого-цифрового перетворення.

Для боротьби із дрейфом і $1/f$ -шумом, що звичайно є основними шумами підсилювача, в електронному тракті ІЧС часто використовують подвійну корельовану вибірку сигналу з кожної комірки схеми зчитування: перший раз на початку кадру, другий – в кінці і наступне визначення різниці цих сигналів для приведення до нуля напруги на виході підсилювача на початку циклу накопичення сигналів. Проте, зменшуючи чи усуваючи шум

на низьких частотах, подвійна корельована вибірка призводять до його посилення на високих. Для вирішення проблеми зменшення шуму на даному етапі розвитку цифрової обробки зображень застосовується декілька методів. Розглянемо докладніше один з них.

Під час роботи тепловізійної системи відбуваються зміни сигналів (поява шумів), залежні від внутрішніх факторів, через які втрачаються фрагменти зображень. Причинами появи шумів є:

- дискретна природа речовини, з якої зроблені фоточутливі елементи матриці (розкид характеристик фоточутливих елементів);
- зернистість матриці (биті пікселі);
- тепловий рух частинок;
- швидкі флуктуації відносно середнього значення сигналу та ін.

Шуми порушують точність вимірювання і є причиною низької межі виявлення цілі.

Процес виправлення шуму - це корекція неоднорідності чутливості. Даний процес є однією з основних функцій для матричних фотоприймачів і здійснюється за допомогою процедури калібрування [82]. Процедура калібрування проводиться методом двоточної корекції. Даний метод дозволяє провести оцінку нерівномірності зображення і рівня шуму тепловізійного сигналу по двом різним значенням температури при рівномірному засвіченні об'єктива. Для цього проводиться розрахунок відносної середньоквадратичної нерівномірності для вхідного і вихідного кадру, визначається усереднене по всіх елементах значення рівня шуму. Калібрування по першій точці (так зване «холодне» калібрування) здійснюється по температурі навколишнього середовища. Калібрування по другій точці проводиться по температурі на 20 С вищій ніж для першої точки – «гаряче» калібрування. Під час калібрування визначаються параметри покращення якості зображення – поправочні коефіцієнти, виявляються «дефектні» пікселі. Калібрування по низькій температурі надає можливість розрахувати коефіцієнти компенсації постійної складової сигналу, по високій

температурі – коефіцієнтів компенсації розкиду вольтової чутливості. Вирівнювання чутливості проводиться для того, щоб всі елементи зображення рівномірно освітленого об'єкту відтворювалися з однаковою яскравістю.

Користуючись двома значеннями температури складають систему рівнянь для знаходження поправочних коефіцієнтів. Під час калібрування по низькій температурі здійснюється обробка великої кількості кадрів (декілька сотень) для їх розрахунку з використанням середнього відхилення, математичного сподівання, середнього значення кожного елемента.

По отриманим результатам формується і зберігається таблиця поправочних коефіцієнтів для забезпечення апаратної корекції значень кадрів [83]. Під час калібрування по високій температурі розраховуються нові значення середньоквадратичного відхилення, математичне сподівання, середнє значення та поправочні коефіцієнти для визначення «неправильних» пікселів.

Сформовані таблиці переписуються в оперативний запам'ятовуючий пристрій інтерфейсного модуля. Таблиці «дефектних» елементів містять інформацію про несправні елементи, методи їх виправлення (інтерполяція або заміна) і інформацію про справні елементи, що беруть участь в усуненні несправностей. На цьому процедура калібрування закінчується. Включається режим реального часу. Кожен наступний кадр обробляється з урахуванням отриманих поправочних коефіцієнтів, тим самим вирівнюючи фоточутливі елементи по чутливості.

2.5 Цифрові методи зменшення похибок дискретизації.

Поява помилкових низькочастотних складових в спектрі сигналу (накладення спектрів) через дискретну структуру МПВ в інфрачервоних системах бачення є принциповим недоліком таких систем, оскільки призводить до спотворення спектру зображення, а потім і сигналу на екрані системи відображення.

Спотворення зображення, що виникає при дискретизації аналогового сигналу в результаті накладення спектрів називають редукцією просторових частот, або шумом просторової дискретизації. Цей шум носить мультиплікативний характер, оскільки залежить не тільки від параметрів МПВ, але і від структури первісного зображення. Засоби зменшення шкідливого впливу просторової дискретизації можуть бути різноманітними.

Наприклад, зображення, до якого була застосована вибірка в окремих рівновіддалених одна від одної точках, можна занести до пам'яті, а потім, помножити кожен відлік на значення деякої вагової функції, подвоїти крок між ними. Відомі також спосіб розкладу функції, що описує зображення, в ряд ортогональних функцій Уолша та ін. [31].

Ефективним засобом боротьби з накладенням спектрів є також мікросканування, яке здійснюється шляхом зрушення зображення (кадру) відносно МПВ на якусь частину періоду розташування елементів МПВ і подальшої вибірки цього зображення (субкадру або субзображення). Після того цифрові зображення (субкадри) об'єднуються, утворюючи один повний кадр. У відомих системах найчастіше використовується зсув на половину періоду розташування елементів МПВ по кожній координаті, тобто чотирьохпозиційне мікросканування. При цьому досягається подвоєна частота вибірки, в порівнянні з частотою, що визначається періодом розташування елементів МПВ, а просторово-частотна характеристика всієї системи залишається незмінною, тобто відповідає геометрично-оптичним параметрам МПВ. Накладення спектрів і супутні спотворення при цьому помітно ослаблюються, тобто високі просторові частоти в спектрі зображення (або відповідні їм дрібні деталі) успішно зображуються. Мікросканування дозволяє понизити вимоги до МПВ, тобто використовувати в системі МПВ меншого формату з великим періодом пікселів або об'єктив з меншою фокусною відстанню, що важливо у зв'язку з прагненням спростити конструкцію і зменшити вартість як МПВ, так і МБК в цілому [53].

Щоб зменшити спотворення зображення через редукцію частот при виборці, необхідно:

- обмежувати смугу частот сигналу;
- підбирати певну частоту вибірки;
- застосовувати реконструкційні фільтри, що відповідають конкретним параметрам сигналу і вибірки.

Найбільш принципові труднощі викликає перший варіант, оскільки спектр більшості реальних сигналів, що поступають на вхід МБК, містить високочастотні складові, що відповідають дрібним деталям і краям окремих фрагментів об'єктів, що спостерігаються, а саме ці частоти найчастіше використовуються для відокремлення корисних сигналів на фоні перешкод і шумів при виявленні, розпізнаванні, класифікації і знаходженні координат об'єкта [81].

Слід відмітити, що ІЧ системи візуалізації можуть виявляти сигнали від об'єктів, просторові частоти яких перевищують деяке певне значення просторової частоти, але не здатні відтворити ці сигнали без спотворень через наслідки вибірки при дискретизації – виникнення побічних гармонік і перекриття частот в низькочастотній області спектру. Так, при калібруванні ІЧ системи з достатньо високою частотою вибірки по тест-об'єкту у вигляді міри, в якій просторова частота перевищує так звану частоту Найквіста, зображення міри буде спотворено і міститиме меншу кількість штрихів, ніж тест-об'єкт. При малій просторовій частоті вибірки штрихи міри через зрушення спектру в область низьких частот можуть створити досить однорідну структуру зі слабким контрастом, що світиться.

Висновки до розділу 2

1. Дослідження узагальненої математичної моделі МБК космічного базування дозволило оцінити просторову та енергетичну роздільну здатність камери враховуючи параметри об'єкту, фону, оптичної системи та приймача випромінювання.
2. В якості критеріїв просторової та енергетичної роздільної здатності МБК обрано такі узагальнені характеристики МБК як мінімальна роздільна різниця температур та мінімальна виявлювальна різниця температур.
3. Проведене математичне моделювання показало, що розглянута МБК забезпечує виявлення об'єктів розміром 200 м на поверхні Землі (при висоті орбіти 668 км) з температурним контрастом від 0,3 К (панхроматичний спектральний канал) до 3 К (спектральний канал 12,5 – 13,5 мкм), тобто МБК потребує покращення характеристик.
4. В результаті аналізу математичної моделі МБК виявлено наступні шляхи покращення характеристик МБК: використання світлосильних об'єктивів, більш чутливих приймачів випромінювання, зменшення частоти кадрів приймача тощо. Використання мікроболометричної матриці з меншим розміром пікселя також дозволить покращити просторову роздільну здатність МБК.
5. Обґрунтовано покращення якості зображень МБК шляхом зменшення впливу геометричного шуму приймача випромінювання та шляхом застосування цифрових методів зменшення похибок дискретизації.

РОЗДІЛ 3

ПІДВИЩЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ І ЕНЕРГЕТИЧНОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ МІКРОБОЛОМЕТРИЧНОЇ КАМЕРИ

3.1 Реалізація субпіксельної реєстрації зображень шляхом повороту мікроболометричної матриці на визначений кут відносно напрямку польоту КА

3.1.1 Методи субпіксельної реєстрації зображень

Електромеханічне мікросканування. З метою отримання набору кадрів НРЗ для субпіксельного підвищення роздільної здатності було розроблено декілька методів. Різні методи, які зустрічаються в літературі, можна розбити на дві основні групи: відхилення лінії візування електромеханічними приладами з оптичними елементами, та зсув світлових променів за допомогою рідкокристалічних пристроїв керування. Якщо при мікроскануванні не відбувається одночасна реєстрація зображень, частота кадрів системи зменшується в чотири рази, оскільки МПВ зчитується декілька разів для створення одного зображення ВРЗ.

Для систем, в яких сканування здійснюється відхиленням оптичної осі електромеханічними пристроями, фіксовані оптичні лінзи доповнюються оптичним фільтром мікросканування, який складається із дзеркал, призм, або додаткових лінз для регулювання лінії візування системи. Приклад дзеркальної системи фільтрування для мікросканування приведено на рис. 3.1 [13].

Фільтр для мікросканування керується гальванометричними моторами або п'єзоелектричними пристроями і забезпечує крок зміщення між кадрами НРЗ, рівній половині пікселя.

При виборі механізму електромеханічної системи слід приймати до уваги узгодження різноманітних параметрів ваги, розміру, стабільності та кута відхилення. В загальному випадку гальванометри важкі та масивні, але

здатні забезпечувати широкий діапазон рухів та витримувати значні навантаження. На противагу гальванометрам, п'єзоелектричні матеріали менші і легші, проте мають обмежений діапазон рухів (які втім можуть бути прийнятними для задач реалізації мікросканування) і можуть бути нестабільними (наприклад, біморфний – двошаровий п'єзоелемент) [76].

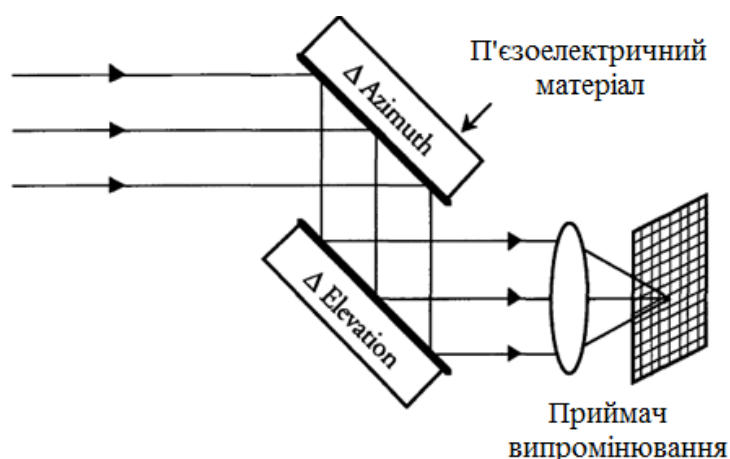


Рис. 3.1. Використання електромеханічних компонентів для відхилення оптичної осі при мікроскануванні

Недоліком систем з електромеханічними елементами є те, що додаткові механізми управління та оптика займають багато місця і збільшують вагу приладу, крім того потребують значні ускладнення функціонування (наявність автоматичних систем слідування – сервоконтурів, пристроїв зчитування положення, тактових генераторів – синхронізаторів та контуру керування). Крім того, переваги процесу мікросканування обмежуються похибками відхилення осі електромеханічною системою, яка потребує калібрування. Електромеханічні пристрої звичайно потребують високих значень струму живлення, і часто працюють в граничному режимі, щоб задовольнити вимоги для реалізації субпікельної реєстрації зображень. Для компенсації похибок положення дзеркал і встановлення перехідного режиму додаються додаткові затримки між формуванням кадрів НРЗ.

Немеханічне мікросканування. Пізніше були досліджені і вдосконалені рідкокристалічні (РК) пристрої керування оптичними променями для

реалізації мікросканування. РК пристрої керування змінюють напрямок оптичних променів електричними засобами. РК технології є привабливою альтернативою електромеханічним методам завдяки спрощенню системи и зменшеним габаритам.

Традиційні РК матеріали прозорі у видимому та інфрачервоному спектрі. За результатами наукових досліджень залежність між різницею напруг змінного струму живлення і відхиленням оптичних променів майже лінійна при роботі в області відсутності насичення РК матеріалів.

РК фільтр для реалізації субпіксельної реєстрації зображень фактично складається з двох електрооптичних РК ґраток товщиною в декілька мікрометрів, поляризованих в ортогональних напрямках, складених разом і розділених двома прозорими шарами. Кожна комірка ґратки має незалежне джерело живлення, яке використовується для контролю коефіцієнта заломлення матеріалу, і викликає відхилення оптичної фази променів, що проходять через елемент РК фільтру. Складена фільтруюча ґратка розміщується між оптикою системи зображення і МПВ, як показано на рис. 3.2 [76]. Як і при електромеханічній реалізації, отримуються чотири кадра НРЗ за рахунок зміни функції напруги для забезпечення необхідних зміщень.

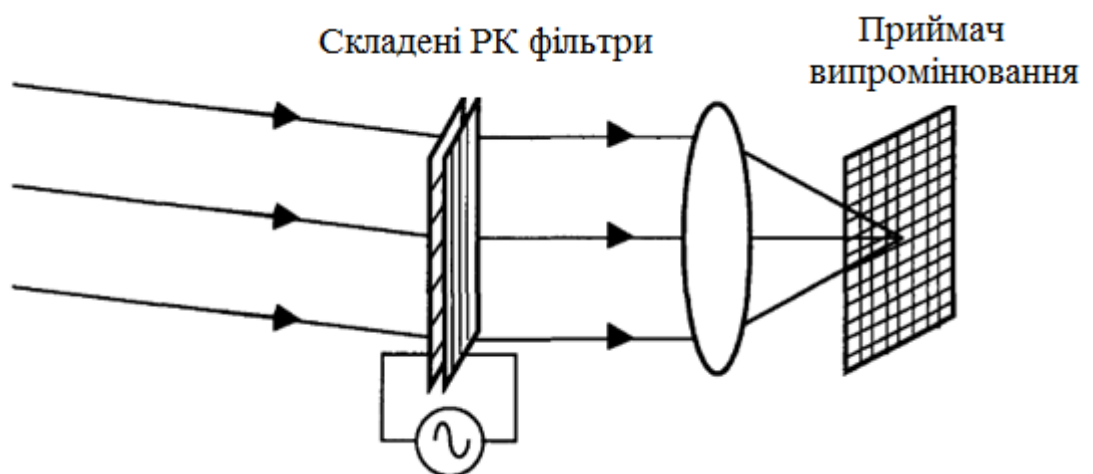


Рис. 3.2. Приклад РК системи для реалізації субпіксельної реєстрації зображень

РК фільтри займають набагато менше місця, ніж електромеханічні

аналоги. Крім того, РК ґратки не мають рухливих частин, і їх чутливість не погіршується з часом. Однак, РК фільтри мають порівняно великі постійні часу.

Електронне мікросканування. Пристрій для електронного мікросканування був розроблений Електро-оптичною лабораторією компанії Райтеон (Raytheon Company Electro-Optics Laboratory) [76]. МПВ для електронного мікросканування – КРТ (Кадмій-Ртуть-Телур) ІЧ приймач розмірами 128 на 128 елементів, який забезпечує створення зображення 256 на 256 елементів. Робочий спектральний діапазон пристрою складає 3 - 5 мкм. Реєстр зміщення по стовпцям розподіляє по комірках сигнали керування. Таким чином, по вищезгаданим принципам з приймача отримуються чотири підкадри розміром 128 на 128 пікселів для подальшого формування зображення розміром 256 на 256 пікселів. На рис. 3.3 наведено геометричну схему приймача на рівні комірок пікселів [26]. В кожному пікселі містяться чотири круглі фотодіоди діаметром 20 мкм. В формуванні одного кадру НРЗ приймають участь тільки фотодіоди одного типу (А, В, С, або D) по черзі. Відстань між центрами фотодіодів складає 25 мкм в обох напрямках.

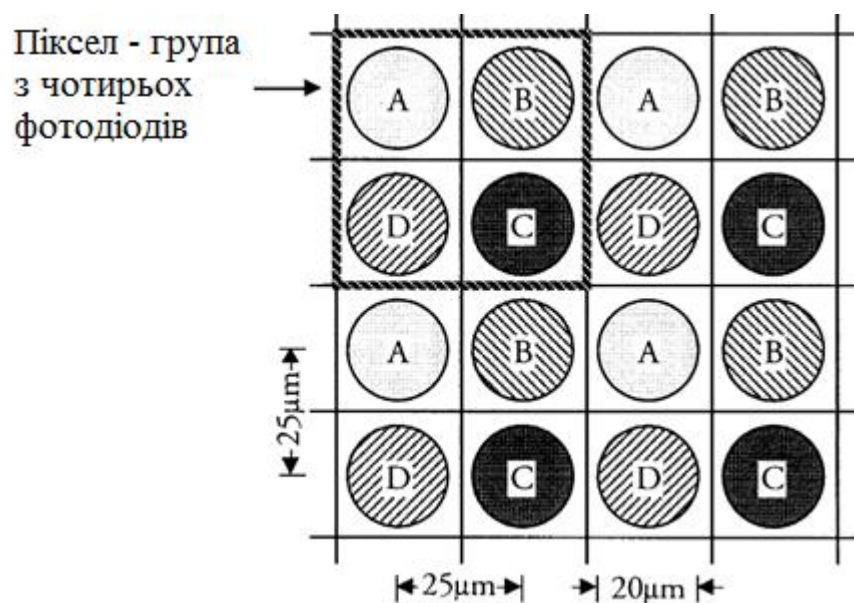


Рис. 3.3. Геометрична схема МПВ для електронного мікросканування

Інтегральна схема зчитування приймача безпосередньо виконує функцію мікросканування. Також субпіксельна реєстрація зображень може реалізуватися шляхом послідовного екранування певної частини пікселів МПВ [70], послідовного лінійного субпіксельного зміщення зображення в фокальній площині вздовж рядків і стовпців МПВ [76], послідовного кутового зміщення оптичної осі знімального приладу вздовж рядків і стовпців МПВ [6], паралельної реєстрації субпіксельно зміщених зображень на різні МПВ за допомогою оптичного розщеплення променів [70].

Недоліком вказаних способів субпіксельної реєстрації зображень є необхідність введення до знімального приладу додаткових пристроїв, які ускладнюють конструкцію [42].

Також існує спосіб отримання зображень ВРЗ шляхом обробки кількох зображень, геометрично зміщених відносно один одного на невідому частку пікселя внаслідок збурень та вібрацій знімального приладу з використанням алгоритму мінімізації неузгодженості [7], або внаслідок руху об'єкта з визначенням вектору руху зображення [76]. Недоліком цих способів є неможливість гарантії визначеного рівня підвищення роздільної здатності, оскільки субпіксельні зміщення зображень є стохастичними.

Оптичне мікросканування. Історично вперше субпіксельну реєстрацію супутникових зображень було застосовано на КА SPOT-5, МПВ якого вміщав дві субпіксельно зміщені одна відносно одної фотоприймальні лінійки (рис. 3.4), що, за твердженням виробника, забезпечувало двократне підвищення просторової роздільної здатності [76].

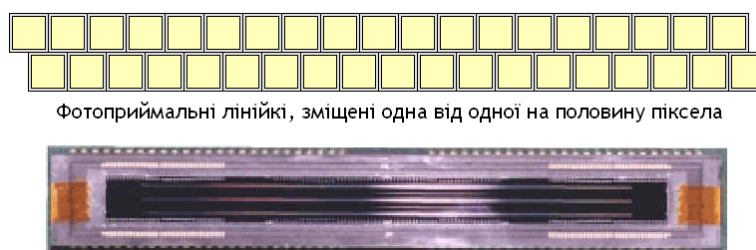


Рис. 3.4. Лінійковий фотоприймач із субпіксельною реєстрацією зображень

Субпіксельна зйомка може реалізуватися багатьма різноманітними способами, серед яких, наприклад застосування прозорих сферичних мікролінз, закріплених на фотоприймальному пристрої [6], як показано на рис. 3.5.

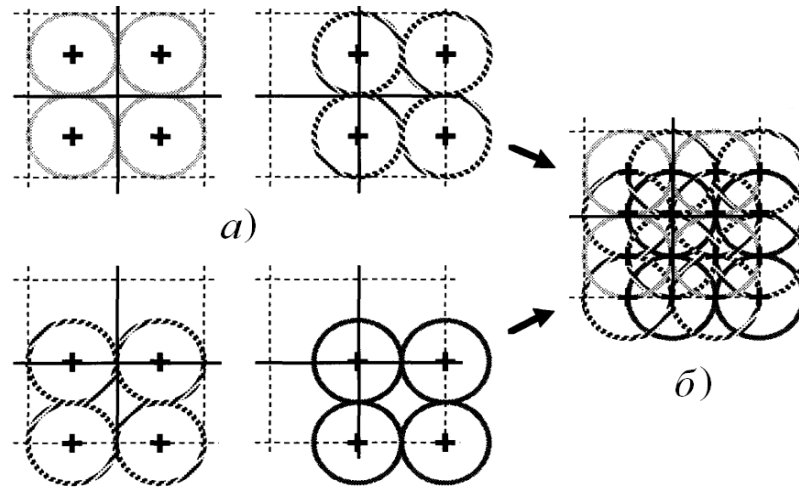


Рис. 3.5. Субпіксельна зйомка за допомогою мікролінзування:

a – вхідні зображення, *б* – зображення підвищеної роздільної здатності

П'єзоелектричне мікросканування. В [76] описано спосіб субпіксельної кадрової аерокосмічної зйомки, яка полягає у здійсненні n експозицій з інтервалом, що відповідає дробовій частині пікселя МПВ, як показано на рис. 3.6. При цьому інтервали експонування узгоджуються зі швидкістю переміщення зображення по МПВ.

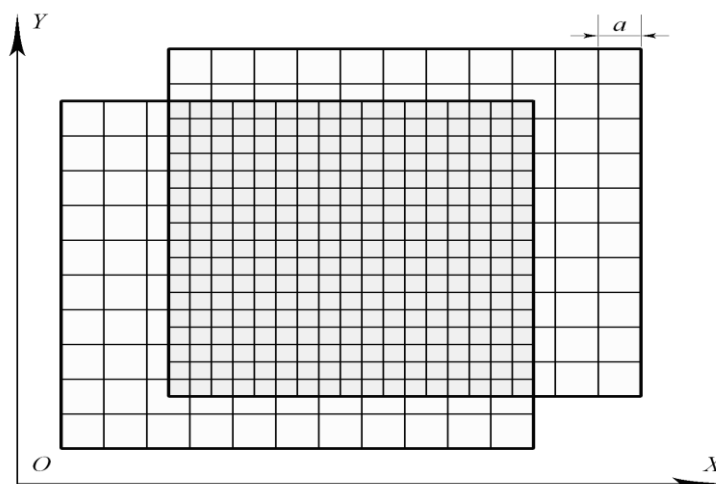


Рис. 3.6. Приклад формування субпікселів МПВ

Зміщення кадрів один відносно одного на певні частки пікселя здійснюється п'єзоелектричним оптичним дефлектором, що складається з безперервно обертової дзеркальної призми та п'єзоелектричних шайб, які виконують зсув засвітки в кадрі на дробову частку пікселів МПВ.

На рис. 3.7 показано оптичну схему цифрової знімальної камери, яка реалізує описаний спосіб. Оптичне зображення місцевості 1 сканується дзеркальною призмою 2 і крізь рухоме дзеркало 3 та об'єтив 6 подається на МПВ 7. Необхідне для зсуву положення дзеркала 3 задається п'єзоелектричними шайбами 4, твердо закріпленими на корпусі 5 камери [76].

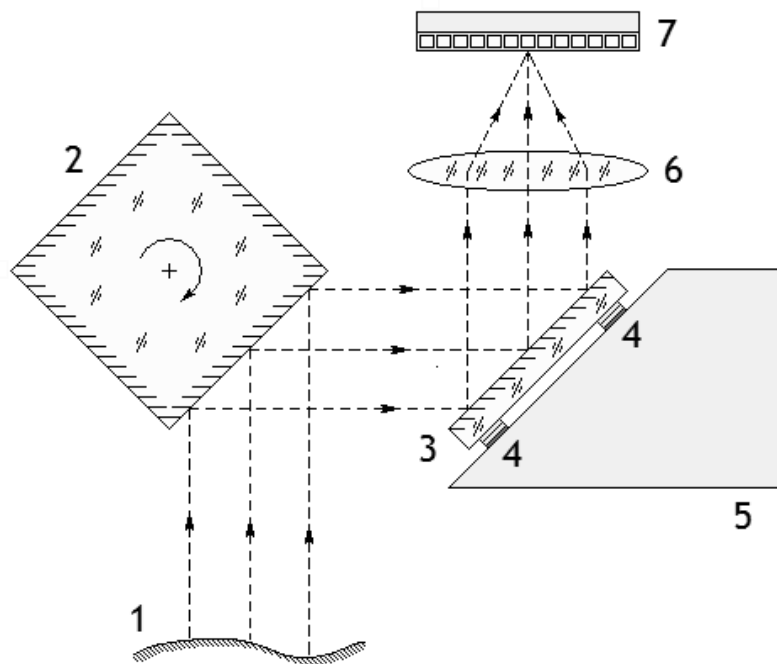


Рис. 3.7. Оптична схема цифрової камери для аерокосмічної зйомки

При змінах швидкості руху носія кутова швидкість обертання дзеркальної призми 2 регулюється таким чином, щоб відношення швидкостей руху зображення по осях X та Y було сталим.

3.1.2 Математична модель реєстрації зображень з субпіксельним зміщенням

Як було зазначено вище, задача підвищення просторової роздільної здатності супутникових зображень полягає в переході від піксельної сітки окремих зображень НРЗ, зміщених на певну частку пікселя одне відносно одного, до єдиної субпіксельної сітки зображення ВРЗ в межах спільного поля огляду [56]. Відношення кроку субпіксельної сітки зображення ВРЗ до кроку піксельної сітки зображень НРЗ назвемо коефіцієнтом підвищення лінійної роздільної здатності зображення, який дорівнює кількості використовуваних зображень із субпіксельними зміщеннями n . Коефіцієнт підвищення роздільної здатності, i , відповідно, кількість кадрів НРЗ n вибирається із врахуванням функціональних особливостей камери і узгоджується з роздільною здатністю оптичної системи.

Надалі у зв'язку з великим радіусом Землі для спрощення розрахунків можна знехтувати кривизною поверхні Землі. У випадку супутникової зйомки послідовність субпіксельно зміщених зображень можна одержати за рахунок власного послідовного руху платформи-носія. Для цього здійснюється поворот МПВ (або всієї камери) відносно напрямку польоту космічного апарату (КА) на кут, який забезпечує синхронне зміщення зображення не тільки вздовж стовпців, але і вздовж рядків МПВ [21].

Назвемо субпіксельні зміщення проекцій кадрів в долях проекції пікселя коефіцієнтами зміщення проекцій кадрів (вздовж проекції стовпців і рядків МПВ). Очевидно, що кут нахилу МПВ відносно напрямку польоту КА залежить від комбінації коефіцієнтів зміщення проекцій кадрів. Для покращення колінеарності з рухом платформи КА субпіксельні зміщення вздовж тангенціальної та нормальної осей МПВ можуть відрізнятися. В такому випадку збільшується припустимий період зйомки послідовних кадрів, що послаблює вимоги до швидкодії знімальної апаратури.

Час формування одного кадру обмежений, з одного боку, вимогою безперервності зйомки в умовах руху платформи-носія знімальної апаратури,

а, з іншого боку, – можливою частотою формування і зчитування кадрів МПВ [22].

В загальному випадку при використанні n зміщених відносно один одного кадрів коефіцієнт зміщення вздовж проекції рядків МПВ складатиме $k_{x'} = 1/n$ піксела, а вздовж проекції стовпців - $k_{y'} = (z + k/n)$ піксела, де $z \geq 0$ – ціле число, яке визначає кількість «пропущених», тобто цілих рядків, які не беруть участі в утворенні субпіксельної сітки, k – ціле число, $0 < k < n$ [6]. Для створення рівномірної по осях субпіксельної сітки при парному значенні n значення k повинні бути непарними.

Знайдемо залежність значення кута нахилу матриці відносно напрямку польоту КА α_1 від коефіцієнтів зміщення проекцій кадрів [70]:

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{k_{y'}}{k_{x'}}\right) = \arctg\frac{1}{zn+k} \quad (3.1)$$

На рис. 3.8 представлені проекції кадрів, отриманих в результаті субпіксельної реєстрації, при наступних значеннях параметрів: $n = 3$, $z = 1$, $k = 1$. Символом P_3 позначено проекцію пікселя на поверхні Землі, V – напрямок польоту КА.

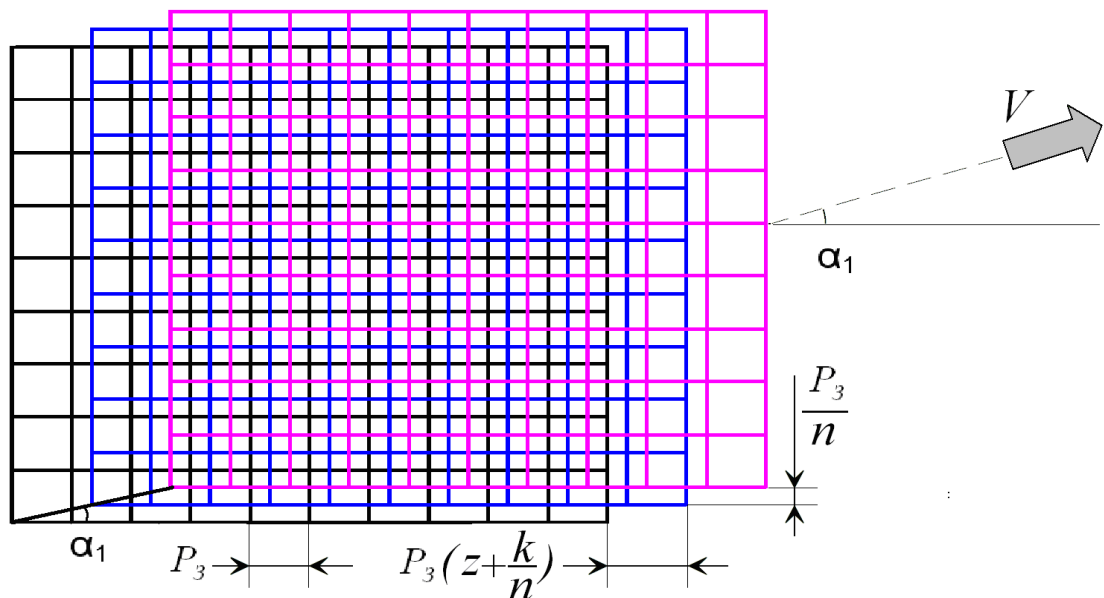


Рис. 3.8. Проекції на поверхні Землі кадрів, отриманих в результаті субпіксельної реєстрації

Узгодження просторової роздільної здатності оптичної системи і МПВ. Просторова роздільна здатність камери для дистанційної зйомки визначається роздільною здатністю оптичної системи, з одного боку, і роздільною здатністю, яку забезпечує МПВ, з іншого.

Розглянемо ІЧ камеру з дифракційно обмеженим об'єктивом і МПВ з розміром пікселя 25 мкм. Для дифракційно обмеженого об'єктива радіус кружка розсіювання визначається радіусом кружка E_r за формулою:

$$r_E = 1,22\lambda \frac{f'_0}{D_p}, \quad (3.2)$$

де D_p – діаметр вхідної зіниці об'єктива. Оскільки відносний отвір $f'_0:D_p = 1$, то для робочої довжини хвилі $\lambda = 10$ мкм діаметр кружка E_r складає 24,4 мкм. Враховуючи розподіл освітленості в плямі розсіювання, допустимим є підвищення роздільної здатності зображення за рахунок субпіксельної реєстрації не більш, ніж в 2 рази, тобто використання тільки двох кадрів із субпіксельним зміщенням на половину пікселя. Використання трьох і більше кадрів із меншими субпіксельними зміщеннями є недоцільним, оскільки роздільна здатність об'єктива буде недостатньою.

Розрахунок кута повороту МПВ. На рис. 3.9 представлено вигляд проєкцій кадрів на поверхні Землі при деяких можливих комбінаціях значень коефіцієнтів зміщення.

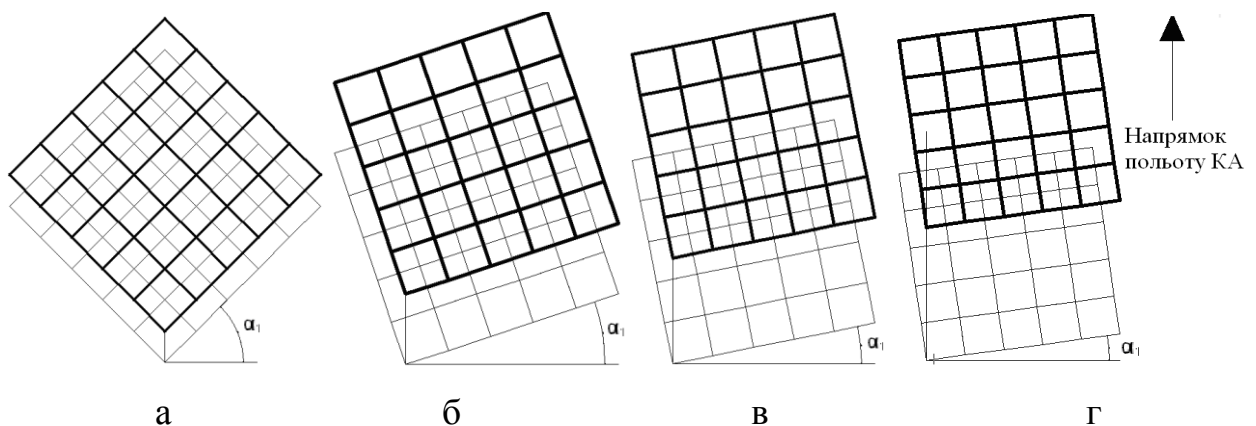


Рис. 3.9. Декілька можливих варіантів повороту матриці детекторів для забезпечення коефіцієнтів зміщення проєкцій кадрів кратними 0,5:

а) $k_{x'} = 0,5, k_{y'} = 0,5;$

б) $k_{x'} = 1,5, k_{y'} = 0,5;$

в) $k_{x'} = 2,5, k_{y'} = 0,5;$

г) $k_{x'} = 3,5, k_{y'} = 0,5$

При такому розташуванні проєкцій кадрів на поверхні Землі формується центральна ділянка зображення підвищеної роздільної здатності, розбита на субпікселі, виділена штриховкою на рис. 3.10. При значній кількості пікселів МПВ ділянками, які не заштриховано на рис. 3.10, можна знехтувати.

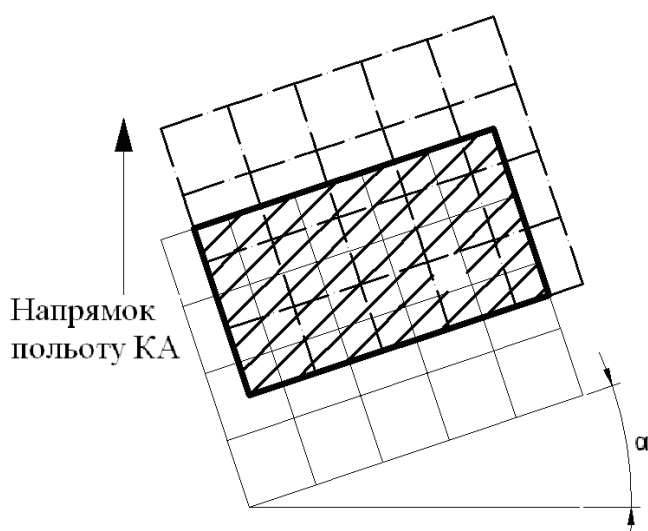


Рис. 3.10. Ділянка зображення підвищеної роздільної здатності при субпіксельній реєстрації зображень

3.1.3 Розрахунок параметрів субпіксельної реєстрації зображень із врахуванням обертання Землі

Крім руху КА на переміщення підсупутникової точки впливає обертання Землі. Ступінь впливу обертання Землі залежить від широти місцевості, що знімається, і ділянки орбіти (низхідна або висхідна ділянка) [43]. Приведена формула (3.1) не враховує вплив обертання Землі. Спочатку

розглянемо два варіанти повороту МПВ при роботі на низхідній ділянці орбіти, наведені на рис. 3.11.

Як видно з рис. 3.11, обертання Землі на низхідній ділянці орбіти переміщує фіксовану точку на поверхні Землі вліво, при цьому підсупутникова точка зміщується вправо по поверхні Землі. Тому при нахилі МПВ проти годинникової стрілки (вліво) додатковий поворот для врахування обертання Землі буде зменшувати кут α_1 , а при нахилі МПВ за годинниковою стрілкою (вправо) – збільшувати його. Збільшення кута α_1 призводить до зменшення ширини смуги зйомки.

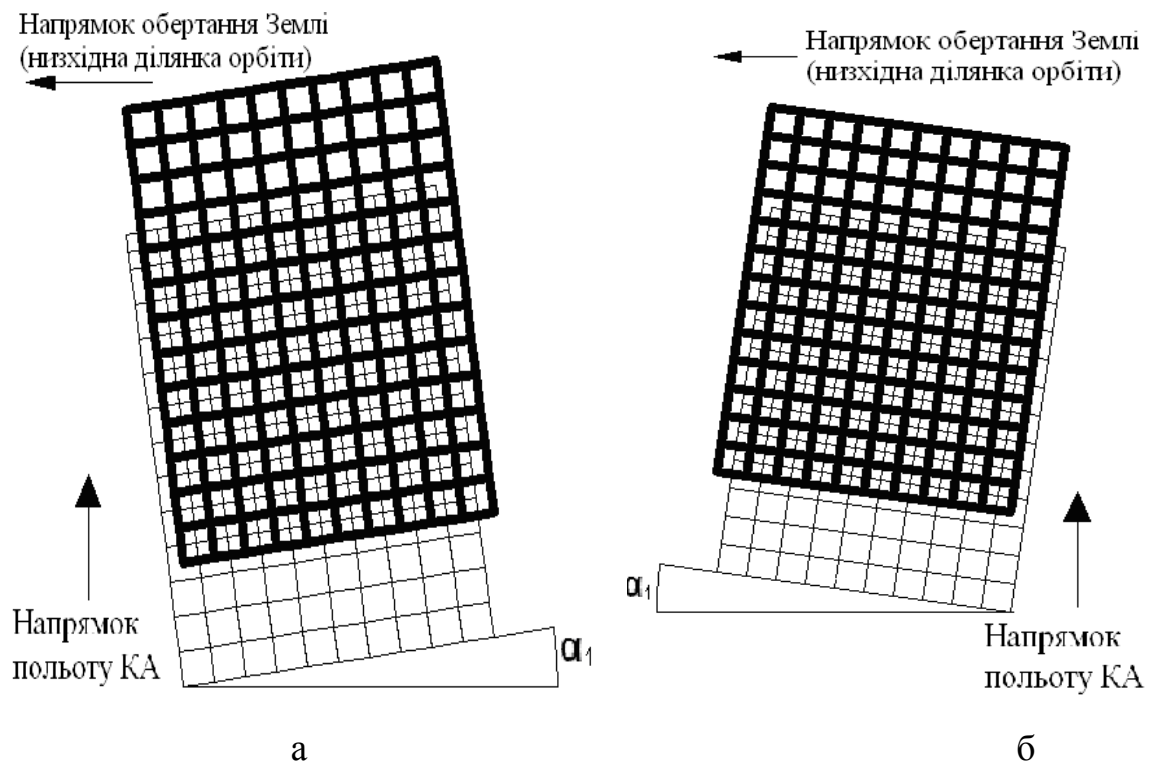


Рис. 3.11. Варіанти повороту МПВ відносно напрямку польоту КА:

а) проти годинникової стрілки (вліво);

б) за годинниковою стрілкою (вправо)

Знайдемо залежність кута нахилу МПВ відносно напрямку польоту КА від значень коефіцієнтів зміщення проєкцій кадрів із врахуванням обертання Землі.

Крок точок зображення на поверхні Землі в напрямку проекції стовпців або рядків МПВ (проекції сторони пікселя на поверхні Землі) для висоти орбіти H визначається виразом:

$$P_z = \frac{a \cdot H \cdot 10^3}{F'}, \quad (3.3)$$

де a - розмір пікселя в міліметрах;

H – висота орбіти в кілометрах;

F' - фокусна відстань об'єктива в міліметрах.

Швидкість підсупутникової точки на поверхні Землі в напрямку польоту КА для низхідної ділянки орбіти знаходимо за формулою:

$$V''_{п.т} = \frac{R_z \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_z + H)^{3/2}} - R_z \cdot \omega_z \cdot \cos i, \quad (3.4)$$

де $R_z = 6371$ км – радіус Землі;

$\mu_0 = 398602$ км³/с² – гравітаційний параметр Землі;

$\omega_z = 15''/с$ – кутова швидкість обертання Землі;

i - нахил орбіти супутника.

Номінальна частота кадрів для більшості МПВ складає $f = 60$ Гц. Також існують приймачі, які працюють на частоті $f = 30$ Гц. Час формування одного кадру пов'язаний із частотою кадрів наступним співвідношенням:

$$\tau = \frac{1}{f} \quad (3.5)$$

За час зйомки одного кадру τ підсупутникова точка зміщується вздовж напрямку руху на відстань S . Проекції цієї відстані на тангенціальну та нормальну осі МПВ, в загальному випадку без врахування обертання Землі, визначаються виразом:

$$S_{x'} = \left(\frac{R_z \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_z + H)^{3/2}} - R_z \cdot \omega_z \cdot \cos(i) \right) \cdot \tau \cdot m \cdot \cos(\varphi), \quad (3.6)$$

де $\tau \cdot m$ – тривалість між двома кадрами, які використовуються. Параметри z та m пов'язані наступним чином:

$$z = m - 1 \quad (3.7)$$

Для забезпечення субпіксельної реєстрації зміщення вздовж стовпців МПВ забезпечується рівним $S_{y'} = k_{y'} \cdot P_3 = 0,5P_3$, а по вздовж рядків МПВ - $S_{x'} = k_{x'} \cdot P_3$, де $k_{x'} = Z + 0.5$ и $k_{y'} = 0.5$ - коефіцієнти зміщення проекцій кадрів на поверхні Землі в напрямках проекцій стовпців і рядків МПВ відповідно. З іншого боку,

$$k_{x'} = \frac{S_{x'}}{P_3} = \frac{\left(\frac{R_3 \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_3 + H)^{\frac{3}{2}}} - R_3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(i) \right) \cdot \tau \cdot n \cdot \cos(\varphi)}{\frac{a \cdot H \cdot 10^3}{F'}} \quad (3.8)$$

Тоді із врахуванням виразів (3.3) та (3.8) отримаємо:

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{k_{y'} \cdot \frac{a \cdot H \cdot 10^3}{F'}}{\left(\frac{R_3 \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_3 + H)^{\frac{3}{2}}} - R_3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(i) \right) \cdot \tau \cdot n \cdot \cos(\varphi)}, \quad (3.9)$$

Звідси значення кута повороту МПВ відносно напрямку руху КА з (3.5) та (3.8):

$$\sin(\varphi) = \frac{k_{y'} \cdot a \cdot H \cdot 10^3}{V''_{n.m.} \cdot \tau \cdot n \cdot F'}, \quad (3.10)$$

Підставивши (3.4) в (3.10), отримаємо вираз для розрахунку кута нахилу МПВ для реалізації субпіксельної реєстрації зображень на низхідній ділянці орбіти із врахуванням обертання Землі

$$\sin(\varphi) = \frac{\left(z + \frac{k}{n} \right) \cdot a \cdot H \cdot 10^3}{\tau \cdot n \cdot F' \cdot \left(\frac{R_3 \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_3 + H)^{\frac{3}{2}}} - R_3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(i) \right)}, \quad (3.11)$$

Для забезпечення режиму субпіксельної реєстрації можуть використовуватися тільки деякі кадри, наприклад, кожний другий ($m = 2$), третій ($m = 3$), четвертий ($m = 4$) кадр і т.д. [70].

За час знімання одного кадру підсупутникова точка зміщується вздовж напрямку руху на відстань S . Проекції цієї відстані на нормальну та тангенціальну осі МПВ визначаються виразами:

$$S_{x'} = V''_{n.m.} \cdot \tau \cdot \cos(\varphi) + V'_{n.m.} \cdot \tau \cdot \sin(\varphi), \quad (3.12)$$

$$S_{y'} = V''_{n.m.} \cdot \tau \cdot \sin(\varphi) - V'_{n.m.} \cdot \tau \cdot \cos(\varphi), \quad (3.13)$$

де $V'_{n.m.}$ - швидкість підсупутникової точки в напрямку, перпендикулярному напрямку польоту, яка обумовлена обертанням Землі і залежить від широти місцевості, яка знімається наступним чином

$$, \quad (3.14) V_{п.т.}^{\perp} = R_3 \cdot \omega_3 \cdot \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 B}$$

де B – значення широти місцевості, що знімається.

Таким чином, другі доданки виразів (3.12) і (3.13) змінюються від 0 (для широти 82°) до максимальних значень (на екваторі). Із врахуванням (3.4) та (3.14) вирази (3.12) і (3.13) матимуть вигляд

$$S_{x'} = \left(\frac{R_3 \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_3 + H)^{\frac{3}{2}}} - R_3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(i) \right) \cdot \tau \cdot \cos(\varphi) + R_3 \cdot \omega_3 \cdot \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 B} \cdot \tau \cdot \sin(\varphi), \quad (3.15)$$

$$S_{y'} = \left(\frac{R_3 \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_3 + H)^{\frac{3}{2}}} - R_3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(i) \right) \cdot \tau \cdot \sin(\varphi) - R_3 \cdot \omega_3 \cdot \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 B} \cdot \tau \cdot \cos(\varphi), \quad (3.16)$$

Для забезпечення субпіксельної реєстрації зміщення вздовж проекцій рядків МПВ забезпечується рівним $S_{y'} = k_{y'} \cdot P_3$, а вздовж проекцій стовпців МПВ – $S_{x'} = k_{x'} \cdot P_3$.

Із врахуванням виразів (3.15) та (3.16) для синхронного зміщення проекцій кадрів час формування кадру τ має забезпечувати наступні умови

(для повороту МПВ за годинниковою стрілкою):

$$\tau = \frac{k_X \cdot P_3}{\left(\frac{R_3 \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_3 + H)^{\frac{3}{2}}} - R_3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(i) \right) \cdot \cos(\varphi) + R_3 \cdot \omega_3 \cdot \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 B} \cdot \sin(\varphi)}, \quad (3.17)$$

$$\tau = \frac{k_Y \cdot P_3}{\left(\frac{R_3 \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_3 + H)^{\frac{3}{2}}} - R_3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(i) \right) \cdot \sin(\varphi) - R_3 \cdot \omega_3 \cdot \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 B} \cdot \cos(\varphi)}, \quad (3.18)$$

Прирівнюючи вирази (3.17) і (3.18), після перетворень отримаємо:

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{k_X \cdot \left(\frac{R_3 \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_3 + H)^{\frac{3}{2}}} - R_3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(i) \right) + k_Y \cdot R_3 \cdot \omega_3 \cdot \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 B}}{-k_Y \cdot \left(\frac{R_3 \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_3 + H)^{\frac{3}{2}}} - R_3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(i) \right) + k_X \cdot R_3 \cdot \omega_3 \cdot \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 B}} \quad (3.19)$$

де ξ - нове уточнене значення кута повороту МПВ відносно напрямку польоту КА з врахуванням обертання Землі.

3.1.4 Вибір оптимального варіанту здійснення субпіксельної реєстрації зображень на основі аналізу похибок

Для розробки оптимальної схеми субпіксельної реєстрації зображень при дистанційній зйомці потрібно:

- вибрати напрямок повороту МПВ;
- вибрати кут повороту МПВ, який визначається комбінацією коефіцієнтів зміщення вздовж проекції стовпців і рядків МПВ;
- вибрати режим використання кадрів (тільки суміжні або пропускання певної кількості кадрів) для забезпечення роботи на стабільній частоті кадрів.

При цьому необхідно врахувати велику кількість факторів: вплив обертання Землі, тобто зміну широту місцевості, зміну висоти польоту, параметри МПВ тощо.

В такому випадку кількість розрахунків для пошуку оптимального варіанту комбінації параметрів субпіксельної реєстрації збільшується. У зв'язку зі зміною висоти польоту, а також широти місцевості, що знімається, в процесі субпіксельної реєстрації зображень виникають похибки при субпіксельній реєстрації [67]. Тому виникла необхідність розробки програмного продукту для вибору оптимальної схеми здійснення режиму субпіксельної реєстрації.

В середовищі MatLab був розроблений програмний продукт для розрахунку можливих варіантів комбінації параметрів режиму субпіксельної реєстрації із врахуванням похибок субпіксельних зміщень, рівних $k_x' = 1/n$ піксела вздовж проекції рядків матриці, і $k_y' = (z + 1/n)$ вздовж проекції стовпців матриці.

Програма розраховує кути нахилу та час формування кадру для кожного цілого значення z , починаючи з 0. Якщо розраховане значення частоти кадрів не лежить в межах заданого діапазону, перевіряється можливість використання кожного другого, третього кадру і т.д. до заданого значення $N_{п.к.}$. Кожен варіант реалізації режиму, при якому частота кадрів потрапляє до заданого діапазону частот, розраховується далі. Інші варіанти відкидаються.

Кожне значення частоти округлюється до величини, яку можна забезпечити регулюванням МПВ, знаходиться відкоректований час формування кадру, а потім знаходяться відкоректовані значення коефіцієнтів зміщення вздовж проекції стовпців і рядків МПВ та їх відхилення від ідеальних значень коефіцієнтів. Також аналізується вплив широти місцевості, що знімається, та зміни висоти орбіти на відхилення коефіцієнтів для кожного з розрахованих режимів субпіксельної реєстрації зображень.

Структура та послідовність роботи програмного модуля детально

описується алгоритмом, приведеним в додатку Б. Нумерація далі відповідає нумерації блоків в алгоритмі. Код програмного модуля приведений в додатку В.

1. Видалення змінних в робочому просторі для запобігання некоректної роботи програмного модуля.

2. Визначення значень вхідних даних для розрахунку, зміна яких не передбачається в процесі розробки МБК, а саме:

- нахил орбіти супутника $i = 98^\circ$;
- фокусна відстань об'єктива $F' = 112,8$ мм;
- номінальна висота орбіти над поверхнею Землі $H_1 = 490$ км; $H_2 = 668$ км
- максимальне відхилення висоти орбіти від номінального значення $\Delta H = \pm 20$ км;
- діапазон значень широти місцевості, що знімається $B = 0^\circ \dots 60^\circ$ (задається у вигляді вектору дискретних значень)
- кутова швидкість обертання Землі $\omega_3 = 15''/\text{с}$;
- радіус Землі $R_3 = 6371$ км;
- гравітаційний параметр Землі $\mu_0 = 398602$ км³/с².

3. Введення користувачем вхідних даних, зміна яких допускається в процесі розробки приладу (наприклад, враховується можлива заміна МПВ):

- розмір пікселя (вважається однаковим по горизонталі і вертикалі) $a = 0,025$ мм;
- максимальна кількість пропущених (не використаних, “викинутих”) кадрів $N_{\text{п.к.}} = m - 1 = 7$;
- максимальне і мінімальне можливі значення частоти кадрів приймача випромінювання $f_{\text{max}} = (30 + 5)$ Гц = 35 Гц; $f_{\text{min}} = (30 - 5) = 25$ Гц.
- мінімальна кількість необхідних для субпіксельної обробки кадрів (коефіцієнт підвищення лінійної розрізненості) $n = 2$.

4. Попередньо відбувається створення нульових векторів для наступного поелементного заповнення на кожній ітерації основного циклу і виведення

результатів розрахунків.

5. Розраховується кут нахилу платформи КА на низхідній ділянці орбіти для оптимізації роботи сканера високої роздільної здатності, який працює у видимому діапазоні спектру, за формулою

$$\overrightarrow{\Delta\psi} = \arctg \frac{\omega_3 \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 \vec{B}}}{\frac{\sqrt{\mu_0}}{(R_3 + H)^{3/2}} - \omega_3 \cdot \cos i}$$

(розрахунок відбувається у векторному вигляді, поелементно, таким чином,

результатом виконання операції є вектор $\overrightarrow{\Delta\psi} = \begin{pmatrix} \Delta\psi_1 \\ \Delta\psi_2 \\ \Delta\psi_3 \\ \Delta\psi_4 \end{pmatrix}$.

6. Знаходиться середнє значення кута нахилу платформи КА в заданому діапазоні широт

$$\Delta\psi_{\text{ср}} = \frac{\Delta\psi_1 + \Delta\psi_2 + \Delta\psi_3 + \Delta\psi_4}{4}.$$

7. Знаходиться значення проекції пікселя на поверхні Землі в метрах за формулою (3.3).

8. Розраховується швидкість підсупутникової точки в напрямку польоту КА для номінального значення висоти орбіти за формулою (3.4).

9. Знаходиться вектор значень швидкості підсупутникової точки в напрямку, перпендикулярному до напрямку польоту КА, для різних значень широти місцевості, що знімається

$$\overrightarrow{V_{\text{п.т.}}^{\perp}} = R_3 \cdot \omega_3 \cdot \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 \vec{B}},$$

у вигляді $\overrightarrow{V_{\text{п.т.}}^{\perp}} = \begin{pmatrix} V_{\text{п.т.1}}^{\perp} \\ V_{\text{п.т.2}}^{\perp} \\ V_{\text{п.т.3}}^{\perp} \\ V_{\text{п.т.4}}^{\perp} \end{pmatrix}.$

10. Розраховується середнє арифметичне значення швидкості підсупутникової точки в напрямку, перпендикулярному до напрямку польоту КА для різних значень широти місцевості, що знімається

$$V_{\text{п.т.ср.}}^{\perp} = \frac{V_{\text{п.т.1}}^{\perp} + V_{\text{п.т.2}}^{\perp} + V_{\text{п.т.3}}^{\perp} + V_{\text{п.т.4}}^{\perp}}{4}$$

11. Обчислюються максимальне і мінімальне значення висоти орбіти

$$H_{\max} = H + 20 \text{ км}, \quad H_{\min} = H - 20 \text{ км}.$$

12. Знаходиться значення проекції пікселя на поверхні Землі для максимального і мінімального значення висоти орбіти

$$P_{\text{зНmax}} = \frac{a \cdot (H_{\max} \cdot 10^3)}{F'}, \text{ м},$$

$$P_{\text{зНmin}} = \frac{a \cdot H_{\min} \cdot 10^3}{F'}, \text{ м}.$$

13. Розраховуються значення швидкості підсупутникової точки в напрямку польоту КА для максимальної та мінімальної висоти орбіти шляхом підстановки значень висоти орбіти в формулу (3.4).

14. Запускається лічильник, початкове значення змінної лічильника $k = 1$.

15. Початкові значення коефіцієнтів:

- зміщення кадрів вздовж проекції стовпців МПВ на поверхні Землі (дорівнює відношенню величини зміщення до проекції сторони пікселя) - $k_{x'} = -0,5$;

- зміщення кадру вздовж проекції рядків МПВ на поверхні Землі $k_{y'} = 0,5$.

16. Перевіряється умова циклу $1 \leq n_{kk} - 1 < N_{n.k}$, де n_{kk} – кількість кадрів), яка дозволяє здійснити перевірку, чи не перевищує кількість пропущених кадрів при реєстрації допустиме значення.

17. Дискретно збільшується значення зміщення кадру вздовж проекції стовпців МПВ $k_{x'} = k_{x'} + 1$.

18. Збільшується змінна лічильника $k = k + 1$

19. Заповнюється кожний наступний елемент вектору номерів даних

$$\vec{m} = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_k \end{pmatrix}; \quad m_k = k, \text{ і вектора значень коефіцієнтів зміщення кадру вздовж}$$

проекції стовпців МПВ $k_{x'k} = k_{x'}$.

20. Обчислюється кут нахилу МПВ без врахування додаткового повороту для компенсації обертання Землі (значення для довідок) за формулою (3.1) та кут нахилу МПВ із врахуванням додаткового повороту для компенсації обертання Землі за формулою (3.19).

21. Заповнюються чергові елементи векторів, що містять значення кутів повороту МПВ із врахуванням та без врахування додаткового повороту для компенсації обертання Землі $\alpha_{1k} = \alpha_1$, $\alpha_k = \alpha$.

22. Обчислюються елементи вектора необхідних кутів повороту МПВ відносно напрямку руху КА

$$\vec{\xi}_X = \arctg \left(\frac{k_{Y'} \cdot V''_{\text{п.т}} + k_{X'} \cdot \overrightarrow{V^{\perp}_{\text{п.т}}}}{k_{X'} \cdot V''_{\text{п.т}} - k_{Y'} \cdot \overrightarrow{V^{\perp}_{\text{п.т}}}} \right)$$

та відносно платформи КА

$$\vec{\xi}_{X''} = \vec{\xi}_X - \overrightarrow{\Delta\psi}$$

у вигляді $\vec{\xi}_{X''} = \begin{pmatrix} \xi_{X''1} \\ \xi_{X''2} \\ \xi_{X''3} \\ \xi_{X''4} \end{pmatrix}$.

Розраховується середнє арифметичне значення кута повороту МПВ відносно платформи КА для заданих значень широти місцевості, що знімається

$$\xi_{X''\text{ср}} = \frac{\xi_{X''1} + \xi_{X''2} + \xi_{X''3} + \xi_{X''4}}{4}$$

та середнє арифметичне значення кута повороту МПВ відносно напрямку руху КА

$$\xi_{X\text{ср}} = \Delta\psi_{\text{ср}} - \xi_{X''\text{ср}}.$$

Середні значення кутів переводяться в градуси та вносяться на відповідні місця векторів середніх значень кутів повороту відносно платформи КА ($\xi_{\text{пл}_k} = \xi_{X''\text{ср}}$) та відносно напрямку руху КА ($\xi_{\text{дв}_k} = \xi_{X\text{ср}}$).

23. Знаходиться час формування кадру, необхідний для реалізації режиму субпіксельної реєстрації

$$\tau = \frac{k_{X'} \cdot P_z}{(V''_{\text{п.т}} \cdot 10^3 \cdot \cos(\xi_{X_{\text{ср}}}) + V^{\perp}_{\text{п.т.ср.}} \cdot 10^3 \cdot \sin(\xi_{X_{\text{ср}}}))}, \text{ с.}$$

24. Знаходиться необхідна частота кадрів МПВ, як величина, обернена до часу формування кадру ($f = \frac{1}{\tau}$, Гц).

25. Відбувається перевірка отриманого значення частоти кадрів на перевищення максимального значення для заданої МПВ $f \leq f_{\max}$.

26. При прийнятному значенні частоти кадрів робочій змінній надається значення цієї частоти $f_n = f$.

27. Умовою циклу 2 є нерівність $f \leq f_{\min}$. Цикл, який дозволяє визначити кількість пропущених кадрів в кожному варіанті реалізації, виконується, доки поточне значення частоти не перевищить мінімальну можливу частоту кадрів МПВ. Таким чином, шляхом «викидання» деяких з послідовності кадрів досягається більша варіативність способу реалізації режиму.

28. наступне значення кількості пропущених кадрів збільшується

$$n_{\text{кк}} = n_{\text{кк}} + 1$$

29. Розраховується відповідне значення поточної частоти кадрів (із врахуванням нової кількості пропущених кадрів)

$$f = n_{\text{кк}} \cdot f_n, \text{ Гц.}$$

30. Відбувається округлення отриманої частоти до найближчого цілого числа.

31. Коректується значення часу формування кадру відповідно до округленої частоти кадрів. Розраховується значення частоти обертання турелі зі світлофільтрами для формування спектральних діапазонів

$$f_{\text{тур}} = \frac{1}{5 \cdot (1 + n_{\text{кк}})}, \text{ Гц.}$$

32. Розраховується відстань, на яку зміщується підсупутникова точка вздовж проекції стовпців МПВ за розрахований час формування кадру

$$S_{X'} = V''_{\text{п.т}} \cdot \tau \cdot 10^3 \cdot \cos(\xi_{X_{\text{ср}}}) + V^{\perp}_{\text{п.т.ср.}} \cdot \tau \cdot 10^3 \cdot \sin(\xi_{X_{\text{ср}}}), \text{ м.}$$

33. Розраховується відстань, на яку зміщується підсупутникова точка вздовж проекції рядків МПВ за розрахований час формування кадру

$$S_{Y'} = V''_{\text{п.т}} \cdot \tau \cdot 10^3 \cdot \sin(\xi_{X_{\text{ср}}}) - V^{\perp}_{\text{п.т.ср.}} \cdot \tau \cdot 10^3 \cdot \cos(\xi_{X_{\text{ср}}}), \text{ м.}$$

34. Знаходиться реальний коефіцієнт зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців МПВ для розрахованого часу формування кадру

$$k_{X'p} = \frac{S_{X'}}{P_3}.$$

35. Знаходиться реальний коефіцієнт зміщення підсупутникової точки вздовж проекції рядків МПВ для розрахованого часу формування кадру

$$k_{Y'p} = \frac{S_{Y'}}{P_3}.$$

36. Розраховується відхилення реальних коефіцієнтів зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців і рядків МПВ від ідеальних та заповнення чергових елементів векторів $\overrightarrow{\Delta k_{Y'}}$ та $\overrightarrow{\Delta k_{X'}}$

$$\Delta k_{Y'k} = \Delta k_{Y'} = k_{Y'p} - k_{Y'}, \quad \Delta k_{X'k} = \Delta k_{X'} = k_{X'p} - k_{X'}.$$

37. Обчислюється відстань, на яку зміщується підсупутникова точка вздовж проекції стовпців МПВ за час формування кадру при зйомці місцевості з мінімальною широтою (в діапазоні заданих користувачем)

$$S_{X'B1} = V''_{\text{п.т}} \cdot \tau \cdot 10^3 \cdot \cos(\xi_{X_{\text{ср}}}) + V^{\perp}_{\text{п.т.1}} \cdot \tau \cdot 10^3 \cdot \sin(\xi_{X_{\text{ср}}}), \text{ м.}$$

38. Обчислюється відстань, на яку зміщується підсупутникова точка вздовж проекції рядків МПВ за час формування кадру при зйомці місцевості з мінімальною широтою (в діапазоні заданих користувачем)

$$S_{Y'B1} = V''_{\text{п.т}} \cdot \tau \cdot 10^3 \cdot \sin(\xi_{X_{\text{ср}}}) - V^{\perp}_{\text{п.т.1}} \cdot \tau \cdot 10^3 \cdot \cos(\xi_{X_{\text{ср}}}), \text{ м.}$$

39. Знаходиться реальне значення коефіцієнту зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців МПВ при зйомці місцевості з мінімальною широтою

$$k_{X'B1} = \frac{S_{X'B1}}{P_3}.$$

40. Знаходиться реальне значення коефіцієнту зміщення підсупутникової точки вздовж проекції рядків МПВ при зйомці місцевості з мінімальною широтою

$$k_{Y'B1} = \frac{S_{Y'B1}}{P_3}.$$

41. Обчислюється відхилення реальних значень коефіцієнтів зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців та рядків МПВ при зйомці місцевості з мінімальною широтою від реальних коефіцієнтів зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців та рядків МПВ при середній швидкості підсупутникової точки для широт. Відбувається заповнення чергових елементів векторів $\overrightarrow{\Delta k_{Y'B}}$ та $\overrightarrow{\Delta k_{X'B}}$

$$\Delta k_{Y'B_k} = \Delta k_{Y'B} = k_{Y'B1} - k_{Y'p};$$

$$\Delta k_{X'B_k} = \Delta k_{X'B} = k_{X'B1} - k_{X'p}.$$

42. Розраховується відстань, на яку зміщується підсупутникова точка вздовж проекції стовпців МПВ за розрахований час формування кадру при максимальному значенні висоти орбіти (в діапазоні, заданому користувачем)

$$S_{X'Hmax} = V''_{п.т.Hmax} \cdot \tau \cdot 10^3 \cdot \cos(\xi_{Xcp}) + V^{\perp}_{п.т.ср.} \cdot \tau \cdot 10^3 \cdot \sin(\xi_{Xcp}), \text{ м.}$$

43. Розраховується відстань, на яку зміщується підсупутникова точка вздовж проекції рядків МПВ за розрахований час формування кадру при максимальному значенні висоти орбіти (в діапазоні, заданому користувачем)

$$S_{Y'Hmax} = V''_{п.т.Hmax} \cdot \tau \cdot 10^3 \cdot \sin(\xi_{Xcp}) - V^{\perp}_{п.т.ср.} \cdot \tau \cdot 10^3 \cdot \cos(\xi_{Xcp}), \text{ м.}$$

44. Знаходиться реальне значення коефіцієнту зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців МПВ при максимальному значенні висоти орбіти

$$k_{X'Hmax} = \frac{S_{X'Hmax}}{P_{3Hmax}}.$$

45. Знаходиться реальне значення коефіцієнту зміщення підсупутникової

точки вздовж проекції рядків МПВ при максимальному значенні висоти орбіти

$$k_{Y'Hmax} = \frac{S_{Y'Hmax}}{P_{эHmax}}$$

46. Обчислюється відхилення реальних коефіцієнтів зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців та рядків МПВ при при максимальній висоті орбіти від реальних коефіцієнтів зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців та рядків МПВ при номінальній висоті орбіти. Відбувається заповнення чергових елементів векторів $\overrightarrow{\Delta k_{Y'H}}$ и $\overrightarrow{\Delta k_{X'H}}$

$$\Delta k_{Y'H_k} = \Delta k_{Y'H} = k_{Y'Hmax} - k_{Y'p},$$

$$\Delta k_{X'H_k} = \Delta k_{X'H} = k_{X'Hmax} - k_{X'p}$$

47. Перевіряється умова циклу $3 \quad f + f_n \leq f_{max}$, яка дозволяє визначити доцільність наступної ітерації розрахунку.

48. Збільшується значення змінної лічильника для синхронізації вихідних даних

$$k = k + 1.$$

49. Збільшується кількість пропущених кадрів

$$n_{кк} = n_{кк-1} + 1.$$

50. Дублюються значення векторів для вихідних даних $f_{нк} = f_{нк-1}$,

$$k_{X'k} = k_{X'k-1}; \alpha_{1k} = \alpha_{1k-1}; \alpha_k = \alpha_{k-1}; \xi_{двк} = \xi_{двк-1}; \xi_{плк} = \xi_{плк-1}.$$

51. Розраховується нове поточне значення частоти кадрів

$$f = n_{кк} \cdot f_n, \text{ Гц.}$$

Після чого відбувається повторний розрахунок відповідно до пп. 30-46.

52. Відбувається зміна формату виведення даних.

53. Формуються рядки з назвами вхідних і вихідних параметрів.

54. Формується рядок з назвами стовпців таблиці вихідних даних.

55. Об'єднуються вектори у матрицю вихідних даних та виведення на екран.

Варіанти режимів субпиксельної реєстрації зображень

Н,км	а, мкм	Е,Гц	Рз,м	φ°	$k_{x'}$	$k_{y'}$	Кол-во про- пуц. кадрів	Мах Похиб ки $k_{x'}$	Мах похиб ки $k_{y'}$
668	25	30 - 60	148,1	45	0,5	0,5	-	-	-
				18,43	0,5	1,5	0	0,020	0,050
							1	0,019	0,049
				11,31	0,5	2,5	1	0,034	0,084
							2	0,033	0,082
				8,13	0,5	3,5	2	0,048	0,117
							3	0,047	0,115
				6,34	0,5	4,5	2	0,060	0,148
							3	0,061	0,149
							4	0,061	0,150
							5	0,060	0,148
				5,19	0,5	5,5	3	0,074	0,181
							4	0,074	0,183
							5	0,074	0,181
6	0,074	0,182							
490	25	30 - 60	108,6	45	0,5	0,5	-	-	-
				18,43	0,5	1,5	0	0,022	0,064
				11,31	0,5	2,5	1	0,032	0,108
				8,13	0,5	3,5	1	0,046	0,153
							2	0,045	0,151
				6,34	0,5	4,5	1	0,059	0,196
							2	0,058	0,193
							3	0,059	0,196
				5,19	0,5	5,5	2	0,071	0,237
							3	0,071	0,237
							4	0,071	0,237

При виборі параметрів дистанційної зйомки оцінювалися наступні відхилення:

- відхилення реальних коефіцієнтів зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців і рядків МПВ від ідеальних (в розглянутому випадку дорівнюють 0,5);
- відхилення реальних коефіцієнтів зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців і рядків МПВ при зйомці місцевості з мінімальною широтою від реальних коефіцієнтів зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців і рядків МПВ при середній швидкості підсупутникової точки для широт;
- відхилення реальних коефіцієнтів зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців і рядків МПВ при максимальній висоті орбіти від реальних коефіцієнтів зміщення підсупутникової точки вздовж проекції стовпців і рядків МПВ при номінальній висоті орбіти.

Найбільші значення похибок відповідають граничним значенням висоти польоту і найбільшим значенням коефіцієнту зміщення вздовж проекції стовпців МПВ. Наприклад, для висоти польоту $H_{\text{ном}} = 668$ км за рахунок похибок, пов'язаних із відхиленням реальної висоти орбіти, коефіцієнт зміщення вздовж проекції стовпців МПВ може досягати 0,7 замість 0,5.

В результаті аналізу вибрано наступні значення параметрів субпіксельної реєстрації зображень при роботі на низхідній ділянці орбіти і повороті МПВ за годинниковою стрілкою і номінальній висоті орбіти 668 км:

- кут повороту МПВ відносно напрямку руху КА $\xi_{\text{пов}} \approx 14,35^\circ$ (при частоті кадрів 60 Гц) або $\xi_{\text{пов}} \approx 9,38^\circ$ (при частоті кадрів 30 Гц);
- коефіцієнт зміщення проекцій кадрів вздовж проекції стовпців матриці - $k_{x'} = 2,5$ (при частоті кадрів 60 Гц) або 4,5 (для частоти кадрів 30 Гц);
- кількість пропущених кадрів в обох випадках дорівнюватиме 2.

Вибрані варіанти дозволяють забезпечити виконання субпіксельної реєстрації зображень з мінімальними похибками реєстрації та несуттєвим зменшенням смуги захвату при роботі МПВ на частоті кадрів 30 Гц та 60 Гц [79]. При цьому в обох випадках кількість кадрів, які не обробляються, однакова, що свідчить про уніфікованість вибраного режиму.

3.2 Математична модель субпіксельної обробки зображень в МБК

Для відновлення зображення підвищеної розрізненості МБК із субпіксельним зміщенням двох кадрів (зображення А та зображення В) доцільно застосовувати Гаусівську регуляризацию з перетворенням у вікні [72]. Для оцінки наближення автоковаріаційної матриці цільового зображення можна застосовувати пересемпльоване зображення, а для оцінки автоковаріаційної матриці похибок потрібне спеціально сформоване шумове зображення [76]. Також для забезпечення точності відновлення необхідне враховувати значення субпіксельного зсуву по осях між вхідними зображеннями [63]. З врахуванням викладеного, загальну схему алгоритму субпіксельної обробки зображень подано на рис. 3.12.

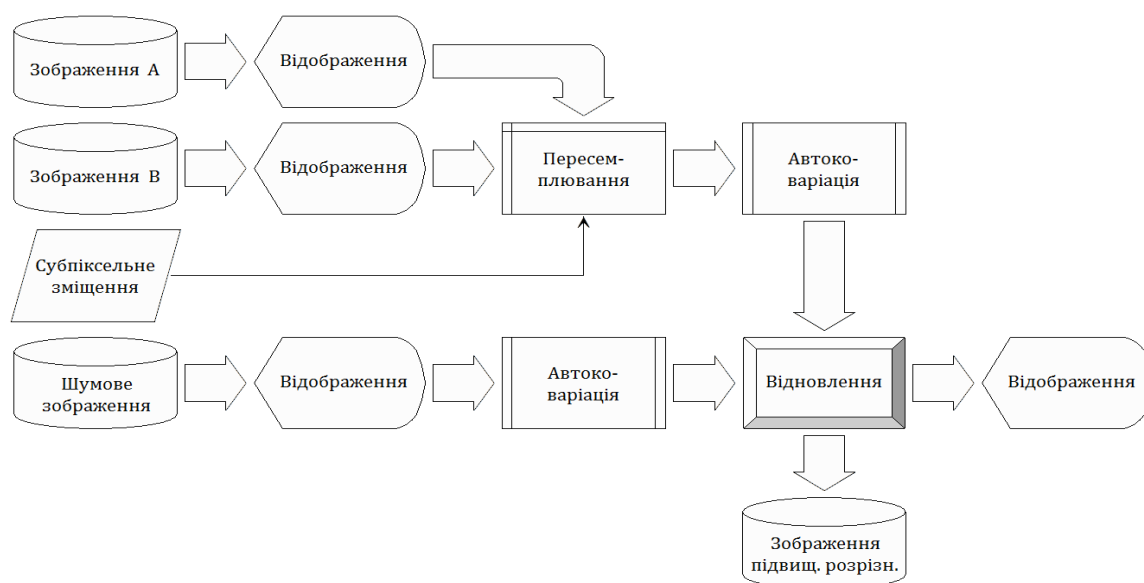


Рис. 3.12. Схема алгоритму субпіксельної обробки зображень, отриманих за допомогою матричної знімальної камери

В результаті субпіксельної обробки одержується зображення підвищеної просторової розрізненості, яке відображається на дисплеї для візуального контролю та зберігається в цифровій формі.

Математично створення зображення підвищеної розрізненості за двома зображеннями низької розрізненості складається з таких етапів [78]:

- обчислення статистик другого порядку;
- регуляризоване обернення оператора;
- застосування регуляризованого оберненого оператора.

Розглядається задача відновлення зображення підвищеної розрізненості за двома зображеннями, зміщеними одне відносно іншого. Вважається що зміщення поступальне, на неціле число пікселів.

Спершу розроблена модель в [76] зводилась до системи лінійних рівнянь. У матричному вигляді рівняння мало вигляд

$$Ax = y + e, \quad (3.20)$$

або

$$y_1 = A^1 x + e_1,$$

$$y_2 = A^2 x + e_2.$$

У [78] застосовано метод гауссівської регуляризації. Вважалось, що істинне зображення Y ($\text{vec } X = x$) підвищеної розрізненості є стаціонарним випадковим полем. Похибки в рівнянні E_1, E_2 ($\text{vec } E_k = e_k$) вважалися незалежними стаціонарними випадковими полями. Оцінка x має вигляд

$$\hat{x} = L(y - \mu) + \mu = L \begin{pmatrix} y_1 - \mu \\ y_2 - \mu \end{pmatrix} + \mu,$$

де

$$L = \Sigma_x A^T (A \Sigma_x A^T + \Sigma_e)^{-1}, \quad (3.21)$$

де Σ_x та Σ_e – апріорні коваріаційні матриці векторів x та e .

Для зменшення обчислювальних витрат (в основному – вимог щодо потрібного об'єму пам'яті) використовувалось перетворення в ковзаючому вікні. Навколо кожного пікселя, значення якого відновлювалось, будувалось вікно. Обчислювалась оцінка лише центрального пікселя вікна.

Цей метод було реалізовано. За результатами його практичного застосування до відновлення субпіксельно зміщених інфрачервоних зображень було помічено такі його недоліки:

- 1) при великих похибках (дисперсії похибок, які використовуються у формулі (3.21) порівняні з дисперсією x) відбувалась деградація контрасту. Це є наслідком регуляризації;
- 2) інколи відновлене зображення було суттєво зашумленим.

Для усунення деградації контрасту оператор L було модифіковано так, щоб функція передачі контрасту оператора збільшення розрізненості для об'єктів, сумірних з розміром вікна, дорівнювала одиниці.

Для зменшення зашумленості зображення використано метод ітеративної реконструкції зображення [65]. Метод полягає у почерговій регуляризації відновленого зображення та усуненні нев'язкок – похибок, які отримуються при підстановці відновленого зображення у рівняння (3.20).

Лінійне рівняння (3.20) невизначене. При перерозподілі значень чотирьох сусідніх пікселів відновленого зображення, які складають піксель зображення низької розрізненості, рівність (3.20) не порушиться. Це дозволяє накласти умови регулярності, задані нерівностями:

$$\min(x_{2i-1,2j}, x_{2i,2j+1}) \leq \max(x_{2i-1,2j+1}, x_{2i,2j}), \quad (3.22)$$

$$\max(x_{2i-1,2j}, x_{2i,2j+1}) \geq \min(x_{2i-1,2j+1}, x_{2i,2j}), \quad (3.23)$$

$$\min(x_{2i,2j-1}, x_{2i+1,2j}) \leq \max(x_{2i,2j}, x_{2i+1,2j-1}), \quad (3.24)$$

$$\max(x_{2i,2j-1}, x_{2i+1,2j}) \geq \min(x_{2i,2j}, x_{2i+1,2j-1}) \quad (3.25)$$

Ті четвірки пікселів зображення підвищеної розрізненості, де ці нерівності порушуються, назовемо “шаблонами” $\begin{pmatrix} + & - \\ - & + \end{pmatrix}$ чи $\begin{pmatrix} - & + \\ + & - \end{pmatrix}$.

Удосконалений алгоритм складається з наступних кроків [78].

1. Грубе суміщення зображень низької розрізненості. Виділення фрагментів зображень низької розрізненості, субпіксельно зміщених одне відносно одного.
2. Знаходження середніх значень та автоковаріаційних функцій зображень і шуму.
3. Розкладання зображень на «низькочастотну» та «високочастотну» складові:

$$\begin{aligned} Y_1^{\text{fragment}} &= Y_1^{\text{lo}} + Y_1^{\text{hi}}, \\ Y_2^{\text{fragment}} &= Y_2^{\text{lo}} + Y_2^{\text{hi}}. \end{aligned}$$

Низькочастотна складова отримується згладжуванням зображень методом ковзаючого середнього.

4. Об'єднання «низькочастотних» складових зображень шляхом інтерполяції. Значення елемента об'єданого зображення X^{lo} отримано усередненням двох найближчих пікселів зображень Y_1^{lo} та Y_2^{lo} .

5. Обчислення операторів регуляризованого оберненого перетворення у вікні. Обчислюються чотири оператора: для зміщення на (Δ_x, Δ_y) , $(\Delta_x, \Delta_y \pm 1)$, $(\Delta_x \pm 1, \Delta_y)$ та $(\Delta_x \pm 1, \Delta_y \pm 1)$, де (Δ_x, Δ_y) – субпіксельне зміщення фрагменту другого зображення відносно фрагменту першого зображення, виміряне в частинах сторони пікселя. Ці фрагменти виділяються на кроці 1. Знак + чи – перед 1 береться так, щоб зміщення $(\Delta_x \pm 1, \Delta_y \pm 1)$, також було субпіксельним, тобто з умови $-1 \leq \Delta_x \pm 1 \leq 1$, $-1 \leq \Delta_y \pm 1 \leq 1$.

6. Обчислення операторів регуляризованого оберненого перетворення у вікні так, щоб функція передачі контрасту (для елементів, сумірних з розміром вікна) дорівнювала одиниці.

7. Обчислення початкового наближення

$$x^{(0)} = L \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix},$$

де y_1 та y_2 – фрагменти «високочастотних» складових зображень низької розрізненості Y_1^{hi} та Y_2^{hi} , розгорнуті у вектори, L – матриця перетворення – регуляризованого збільшення розрізненості.

8. $k := 0$ – початок циклу.

9. Забезпечення виконання нерівностей (3.22) – (3.25).

10. Регуляризація зображення за допомогою медіанного фільтру [16].

11. Усічення діапазону значень відновленого зображення.

12. Імітація погіршення розрізненості:

$$\begin{pmatrix} y_1^{\text{rest}} \\ y_2^{\text{rest}} \end{pmatrix} = Ax^{(k)}.$$

13. Знаходження нев'язок: $\Delta y_1 = y_1 - y_1^{\text{rest}}$ та $\Delta y_2 = y_2 - y_2^{\text{rest}}$.

14. Знаходження поправки:

$$\Delta x = L \begin{pmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \end{pmatrix},$$

та врахування цієї поправки

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x.$$

15. Якщо $k \geq K_{\text{max}}$, закінчити цикл. Якщо $k < K_{\text{min}}$ або якщо поправка почала збільшуватись (тобто якщо $\|x^{(k+1)} - x^{(k)}\| > \|x^{(k)} - x^{(k-1)}\|$), перейти до наступної ітерації та для цього збільшити k , покладаючи $k := k + 1$, далі виконати кроки 9-14.

16. З елементів вектора $x^{(k)}$ формуємо «високочастотну» складову зображення X^{hi} . Остаточне отримане зображення $X = X^{\text{hi}} + X^{\text{lo}}$.

Нижче кроки алгоритму описано більш докладно.

1. Зміщення другого зображення відносно першого задавалось як один із вхідних параметрів алгоритму. Позначимо це зміщення, виміряне в сторонах пікселя, $(\Delta_x^{\text{total}}, \Delta_y^{\text{total}})$. Розділимо це зміщення на «грубе» та субпіксельне,

$$\Delta_x^{\text{total}} = \Delta_x^{\text{int}} + \Delta_x, \quad \Delta_y^{\text{total}} = \Delta_y^{\text{int}} + \Delta_y,$$

де $(\Delta_x^{\text{int}}, \Delta_y^{\text{int}})$ – зміщення зображень на *цїле* число пікселів, (Δ_x, Δ_y) – субпіксельне зміщення зображень, $|\Delta_x| < 1$, $|\Delta_y| < 1$

Виділимо субпіксельно зміщені фрагменти зображення

$$Y_1^{\text{fragment}} = Y_1(\text{range}_y + \Delta_y^{\text{int}}, \text{range}_x + \Delta_x^{\text{int}}), \quad Y_2^{\text{fragment}} = Y_2(\text{range}_y, \text{range}_x),$$

де range_x та range_y – діапазони значень координат тих пікселів другого зображення, які попали у прямокутний фрагмент зображення Y_2^{fragment} для подальшої обробки. Ці діапазони вибираються так, щоб фрагменти зображень повністю лежали всередині початкових зображень. Надалі y_1 та y_2 позначають зображення-фрагменти Y_1^{fragment} та, відповідно, Y_2^{fragment} , розгорнуті у вектор.

2. Знаходження середніх значень та автоковаріаційних функцій зображення.

Нехай потрібно обчислити автоковаріаційну функцію зображення Y розміру $n_1 \times n_2$. Припускалось, що автоковаріаційна функція парна по кожній з координат (насправді автоковаріаційна функція є парною по сукупності координат; більш сильне припущення про парність по кожній з координат може порушуватись, наприклад, при змазуванні зображення рухом у напрямку, не паралельному жодній з осей координат). Середнє арифметичне та автоковаріаційна функція обчислюються за формулами

$$\mu = \frac{1}{n_1 n_2} \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} Y(i, j),$$

$$\gamma(h_1, h_2) = \frac{1}{2n_1 n_2} \sum_{i=1}^{n_1-h_1} \sum_{j=1}^{n_2-h_2} ((Y(i, j) - \mu)(Y(i + h_1, j + h_2)) + (Y(i, j + h_2) - \mu)(Y(i + h_1, j))) ,$$

де $h \geq 0$, $h_2 \geq 0$.

Перед обчисленням автоковаріаційної функції потрібно було задати розмір вікна для обробки. Нехай вікно має розмір $n \times n$ пікселів зображення низької розрізненості. Цільова автоковаріаційна функція обчислювалась при $0 \leq h_1 \leq 2n$, $0 \leq h_2 \leq 2n$. Автоковаріаційна функція шуму обчислювалась при

$$0 \leq h_1 < n, \quad 0 \leq h_2 < n.$$

3. Формули для згладжування зображень методом ковзаючого середнього:

$$Y_p^{\text{lo}}(k, l) = \frac{\sum_{i=\max(-h, k-m)}^{\min(h, k-1)} w_i \sum_{j=\max(-h, k-n)}^{\min(h, l-1)} w_j Y_p^{\text{fragment}}(k-i, l-j)}{\sum_{i=\max(-h, k-m)}^{\min(h, k-1)} w_i \sum_{j=\max(-h, k-n)}^{\min(h, l-1)} w_j}, \quad p=1, 2, \quad k=1, \dots, m, \quad l=1, \dots, n, \quad (1.16)$$

де w_i , $i = -h, \dots, h$, — коефіцієнти шаблону, за яким проводиться згладжування.

Зауважимо, що для пікселів, що лежать далі, ніж на відстані h пікселів від межі зображення, тобто при $h+1 \leq k \leq m-h$, $h+1 \leq l \leq n-h$, «низькочастотна» компонента знаходиться за допомогою згортки

$$Y_p^{\text{lo}}(k, l) = \text{const} \cdot \sum_{i=-h}^h w_i \sum_{j=-h}^h w_j Y_p^{\text{fragment}}(k-i, l-j),$$

де

$$\text{const} = \left(\sum_{i=-h}^h w_i \right)^{-2}.$$

Можливі варіанти вибору коефіцієнтів шаблону w_i :

$$w_i = 1, \quad i = -h, \dots, h,$$

(прямокутний шаблон) або

$$w_i = \frac{(h+1)^2 - 2i^2}{(h+1)^2}, \quad -\frac{h+1}{2} \leq i \leq \frac{h+1}{2};$$

$$w_i = 2 \frac{(h+1-|i|)^2}{(h+1)^2}, \quad \frac{h+1}{2} \leq |i| \leq h$$

(дзвоноподібний шаблон).

«Високочастотна» складова дорівнює

$$Y_p^{\text{hi}} = Y_p^{\text{fragment}} - Y_p^{\text{lo}}, \quad p=1, 2.$$

4. Злиття двох «низькочастотних» зображень шляхом інтерполяції. У випадку $\Delta x > 0$, $\Delta y > 0$ немежові значення об'єднаного зображення знаходяться з рівнянь

$$\begin{aligned}
2X^{lo}(2i, 2j) &= Y_1^{lo}(i, j) + Y_2^{lo}(i, j), \\
2X^{lo}(2i, 2j+1) &= Y_1^{lo}(i, j+1) + Y_2^{lo}(i, j), \\
2X^{lo}(2i+1, 2j) &= Y_1^{lo}(i+1, j) + Y_2^{lo}(i, j), \\
2X^{lo}(2i+1, 2j+1) &= Y_1^{lo}(i+1, j+1) + Y_2^{lo}(i, j).
\end{aligned}$$

5. Прямий оператор A_1^{window} погіршення вдвічі розрізненості у вікні діє з $(2n+1) \times (2n+1)$ -вимірному простору у $2 \times n \times n$ -вимірний.

Матриця оператора A_1^{window} має розмір $2n^2 \times (2n+1)^2$, елементами якої є площа пікселя високої розрізненості (пікселі високої розрізненості відповідають стовпцям матриці), яка попала в піксель зображення низької розрізненості (пікселі низької розрізненості відповідають рядкам матриці). За одиницю площі береться площа пікселя зображення низької розрізненості. У кожному рядку матриці чотири ненульові елементи, $|\Delta_x| |\Delta_y|, |\Delta_x|(1-|\Delta_y|), (|\Delta_x|-1)|\Delta_y|, (1-|\Delta_x|)(1-|\Delta_y|)$. У кожному стовпці матриці оператора не більше двох ненульових елементів, і ці елементи однакові.

За цільову автоковаріаційну функцію зображення бралась середня автоковаріаційна функція двох вхідних зображень. Цільова коваріаційна матриця Σ_x має розмір $(2n+1)^2 \times (2n+1)^2$ та складається зі значень автоковаріаційної функції:

$$\Sigma_x(i_1, j_1; i_2, j_2) = \gamma(|i_1 - i_2|, |j_1 - j_2|).$$

За автоковаріаційну функцію шуму бралась автоковаріаційна функція фонового зображення. Коваріаційна матриця шуму Σ_e має розмір $n^2 \times n^2$ та складається зі значень автоковаріаційної функції.

Регуляризований обернений оператор діє з $2 \times n \times n$ -вимірному простору в $(2n+1) \times (2n+1)$ -вимірний простір. Його матриця обчислюється за формулою:

$$L_1^{window} = \Sigma_x (A_1^{window})^T (A_1^{window} \Sigma_x (A_1^{window})^T + \Sigma_e)^{-1}.$$

Якщо вікно розміру $(2n+1) \times (2n+1)$ у зображенні високої розрізненості буде розташоване так, що його кутові пікселі мають непарні координати, то

вікна (розміру $n \times n$) у фрагментах зображення низької розрізненості $Y_1^{fragment}$ та $Y_2^{fragment}$ будуть мати однакові координати. Інакше ці вікна будуть зсунуті одне відносно іншого на один піксель по одній чи по двох координатах. Тому знаходження оператора L^{window} потрібно зробити чотири рази, для чотирьох різних операторів A^{window} .

6. Обчислювався середній рівень у вікні. Як експеримент, проводилось також обчислення середнього рівня за дзвоноподібним шаблоном.

Модифікація операторів L^{window} здійснювалась за формулою (1.15),

$$\text{де } \omega_1 = \omega_2 = \frac{1}{n^2} 1_{n^2 \times 1}.$$

7. Збільшення розрізненості зображення здійснювалось у ковзаючому вікні. Для кожного пікселя зображення підвищеної розрізненості будувалось навколо нього вікно, яке повністю лежить у відновлюваному фрагменті зображення, так щоб центр вікна був якнайближче до пікселя. (Для пікселів, далеких від межі зображення це значить, що піксель, який потрібно відновити, лежить у центрі вікна.) Далі відповідні вікна виділялись у зображеннях низької розрізненості, і до зображень у цих вікнах застосовувався один з чотирьох операторів L^{window} (який саме – залежало від взаємного зміщення вікон у зображеннях низької розрізненості, а це залежало від того, чи є парними координати кутових пікселів вікна у зображенні високої розрізненості). При застосуванні оператора обчислювався лише один елемент вікна зображення підвищеної розрізненості – той, який відповідає відновлюваному пікселю.

9. Спочатку зауважимо, що нерівності (3.22) – (3.25) мають виконуватись при $\Delta_x \Delta_y > 0$. Якщо Δ_x та Δ_y мають різний знак, то мають виконуватись нерівності

$$\min(x_{2i-1,2j-1}, x_{2i,2j}) \leq \max(x_{2i-1,2j}, x_{2i,2j-1}),$$

$$\max(x_{2i-1,2j-1}, x_{2i,2j}) \geq \min(x_{2i-1,2j}, x_{2i,2j-1}),$$

$$\min(x_{2i,2j}, x_{2i+1,2j+1}) \leq \max(x_{2i,2j+1}, x_{2i+1,2j}),$$

$$\max(x_{2i,2j}, x_{2i+1,2j+1}) \geq \min(x_{2i,2j+1}, x_{2i+1,2j}),$$

Припустимо, що у випадку $\Delta_x \Delta_y > 0$ порушується нерівність (3.20), тобто $\min(x_{2i-1,2j}, x_{2i,2j+1}) > \max(x_{2i-1,2j+1}, x_{2i,2j})$. Для того, щоб нерівність (3.20) стала виконуватись, покладемо

$$x_{2i-1,2j}^{new} = x_{2i-1,2j} - \frac{k}{s_{10}}, \quad x_{2i-1,2j+1}^{new} = x_{2i-1,2j+1} + \frac{k}{s_{11}},$$

$$x_{2i,2j}^{new} = x_{2i,2j} + \frac{k}{s_{00}}, \quad x_{2i,2j+1}^{new} = x_{2i,2j+1} - \frac{k}{s_{01}},$$

де $s_{10} = |\Delta_y| (1 - |\Delta_x|)$, $s_{11} = |\Delta_y| |\Delta_x|$, $s_{00} = (1 - |\Delta_y|) (1 - |\Delta_x|)$, $s_{01} = (1 - |\Delta_y|) |\Delta_x|$ – площі пікселів високої розрізненості, та

$$k = \min \left(\frac{x_{2i-1,2j} - x_{2i-1,2j+1}}{s_{10}^{-1} + s_{11}^{-1}}, \frac{x_{2i,2j+1} - x_{2i-1,2j+1}}{s_{01}^{-1} + s_{11}^{-1}}, \frac{x_{2i-1,2j} - x_{2i,2j}}{s_{10}^{-1} + s_{00}^{-1}}, \frac{x_{2i,2j+1} - x_{2i,2j}}{s_{01}^{-1} + s_{00}^{-1}} \right).$$

Після цього

$$\min(x_{2i-1,2j}^{new}, x_{2i,2j+1}^{new}) = \max(x_{2i-1,2j+1}^{new}, x_{2i,2j}^{new})$$

Порушення нерівностей (3.21) – (3.23) виправляється аналогічно.

10. Медіанний фільтр. Кожен елемент замінюється на середнє (медіану) з п'ятих значень – значення самого пікселя та чотирьох сусідніх пікселів перед виконанням кроку 10.

11. Заміняємо елемент зображення високої розрізненості $x_{i,j}$ на

$$x_{i,j}^{new} \begin{cases} -\frac{1}{2}(\mu_{y_1} + \mu_{y_2}), & x_{i,j} < -\frac{1}{2}(\mu_{y_1} + \mu_{y_2}), \\ x_{i,j} & -\frac{1}{2}(\mu_{y_1} + \mu_{y_2}) \leq x_{i,j} \leq y_{\max} - \frac{1}{2}(\mu_{y_1} + \mu_{y_2}), \\ y_{\max} - \frac{1}{2}(\mu_{y_1} + \mu_{y_2}), & x_{i,j} > y_{\max} - \frac{1}{2}(\mu_{y_1} + \mu_{y_2}), \end{cases}$$

де y_{\max} – найбільше змістовне значення пікселя.

12. Кожен піксель штучно погіршених зображень (які після розгортання в вектор позначаються y_1^{rest} та y_2^{rest}) отримується як усереднення чотирьох

елементів відновленого зображення підвищеної розрізненості з вагами, $|\Delta_y| |\Delta_x|$, $(1-|\Delta_y|) |\Delta_x|$, $|\Delta_x| |\Delta_y|$, $(1-|\Delta_x|) |\Delta_y|$, $(1-|\Delta_y|)(1-|\Delta_x|)$, рівними площам цих елементів.

Оператор A відрізняється від оператора A_1^{window} тим, що діє не у вікні, а в усьому фрагменті зображення.

14. Поправки обчислювались таким самим способом, як і початкове наближення на кроці 7. Замість вхідних зображень використовувались нев'язки, обчислені на кроці 13.

15. Ітераційний алгоритм виконується, поки норма поправки зменшується. Задається також гарантована кількість ітерацій $K_{min} \geq 2$ та максимальна кількість ітерацій K_{max} .

16. Складаємо результат об'єднання «високочастотних» складових зображень та результат об'єднання «низькочастотних» складових зображень.

3.3 Вплив субпіксельної обробки зображень на просторову енергетичну роздільну здатність мікроболометричної камери

Фізично вплив субпіксельної обробки на функціонування МБК можна представити, як заміну ПВ на приймач з меншим розміром пікселя [45]. При незмінних оптичній системі і електронному блоці МПФ камери із застосуванням субпіксельної реєстрації зображень з наступною їх обробкою можна представити наступним чином для одномірного випадку

$$M_{SSR}(v_x) = M_O(v_x) M_{DSR}(v_x) M_{Dt}(v_x) M_{El}(v_x), \quad (3.26)$$

де $M_{DSR}(v_x)$ - просторова МПФ ПВ з розміром елемента, рівним розміру еквівалентного субпікселя – умовної частини пікселя, значення сигналу від якого визначається в результаті субпіксельної обробки.

$$M_{DSR}(v_x) = \frac{\sin(\pi V_{DSR} v_x)}{\pi V_{DSR} v_x}. \quad (3.27)$$

При цьому розмір еквівалентного субпікселя визначається як

$$V_{DSR} = \frac{V_D}{k_{LSR}}. \quad (3.28)$$

Після підстановки (3.28) в (3.29) отримуємо вираз для МПФ МБМ із врахуванням коефіцієнта підвищення роздільної здатності при субпіксельній реєстрації [45].

$$M_{DsSR}(v_x) = \frac{\sin(\pi \frac{v_D}{k_{LSR}} v_x)}{\pi \frac{v_D}{k_{LSR}} v_x}. \quad (3.29)$$

На рис. 3.13 представлені графіки МПФ МБМ $M_{DsSR}(v_x)$ при різних значеннях коефіцієнта підвищення лінійної роздільної здатності (КПЛРЗ) k_{LSR} (розмір пікселя складає 25 мкм).

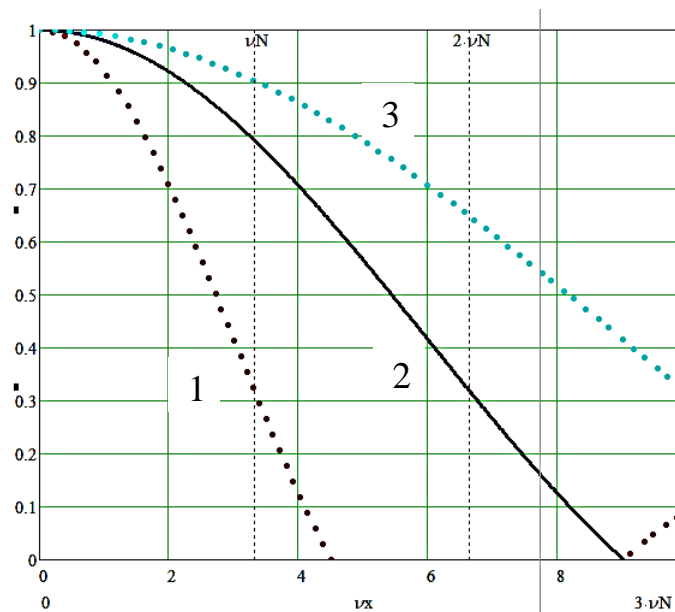


Рис. 3.13. Графік залежності просторової МПФ мікроболометричної матриці $M_{DsSR}(v_x)$ МБК з субпіксельною обробкою від просторової частоти для наступних значень КПЛРЗ:

1 – для $k_{LSR} = 1$; 2 – для $k_{LSR} = 2$; 3 – для $k_{LSR} = 3$

Для визначення формули розрахунку МРРТ використаємо формулу з [54], яка дозволяє отримати значення МРРТ сучасних МБК без врахування особливостей зорової системи оператора. З врахуванням ослаблення випромінювання в атмосфері та оптичною системою отримаємо:

$$MRTD(v_x) = \frac{\pi}{4\tau_o \cdot \tau_a \cdot K_{\Delta\lambda}} SNR_r \frac{NETD}{M_s(v_x)}, \quad (3.30)$$

Підставивши (3.26) до (3.30) та врахувавши, що МПФ системи електронної обробки та часова МПФ приймача не чинять суттєвого впливу на МПФ камери, тобто $M_{Dt}(f) \cong 1$; $M_{El}(f) \cong 1$, матимемо

$$MRTD(\nu_x) = \frac{\pi}{4\tau_o \cdot \tau_a \cdot K_{\Delta\lambda}} SNR_r \frac{NETD}{M_O(\nu_x) M_{DsSR}(\nu_x)}, \quad (3.31)$$

На рис. 3.14 и 3.15 представлено графіки функції (3.31) МБК із застосуванням субпіксельної реєстрації зображень для різних спектральних діапазонів і коефіцієнтів підвищення лінійної роздільної здатності (КПЛРЗ) k_{LSR} .

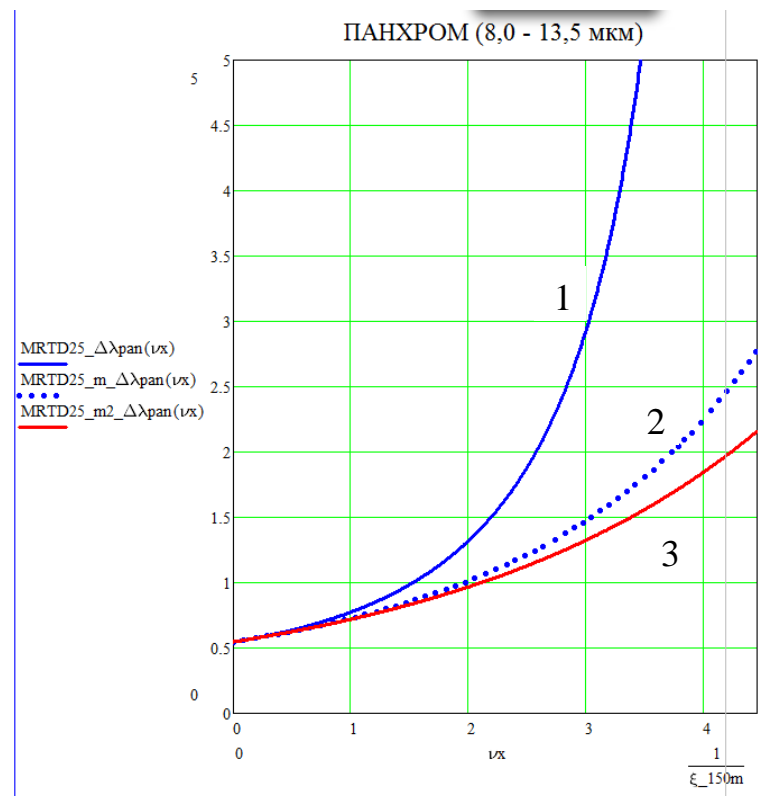
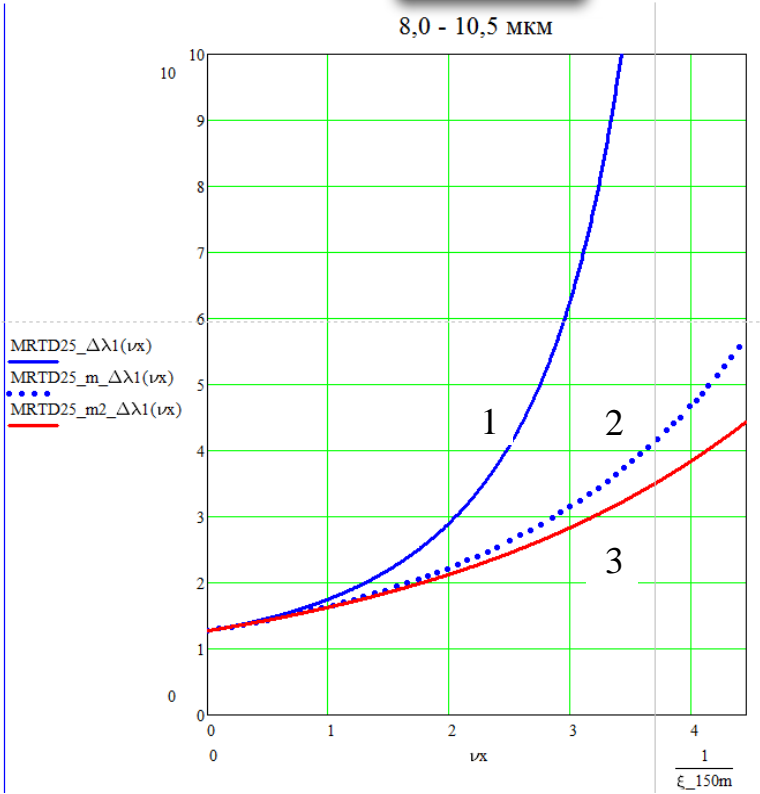


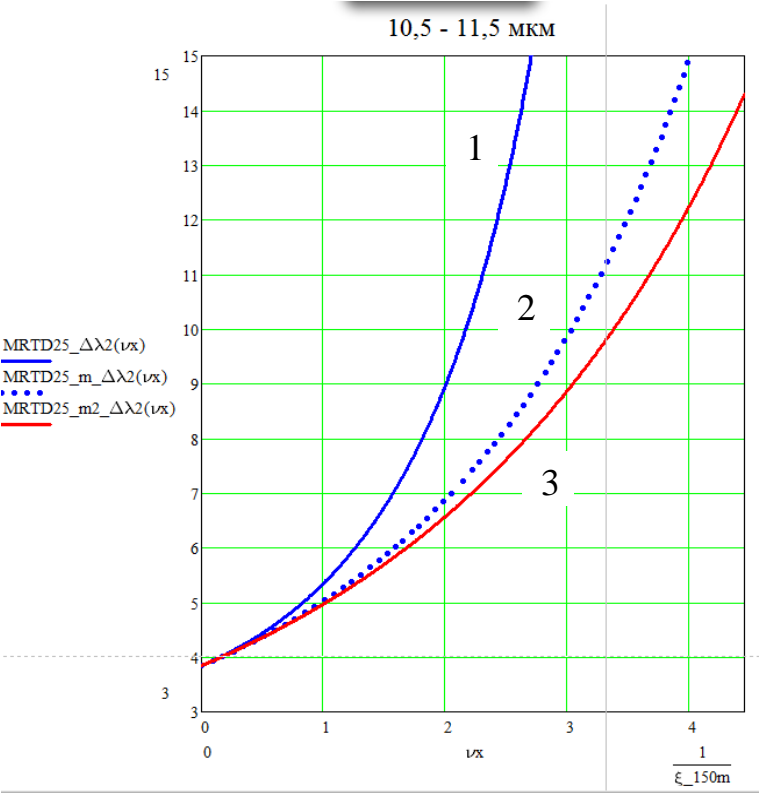
Рис. 3.14. Графік залежності мінімальної роздільної різниці температур $MRTD(\nu_x)$ МБК від просторової частоти в робочому спектральному діапазоні (8,0 - 13,5) мкм для наступних значень КПЛРЗ:

1 - для $k_{LSR} = 1$ (без субпіксельної обробки);

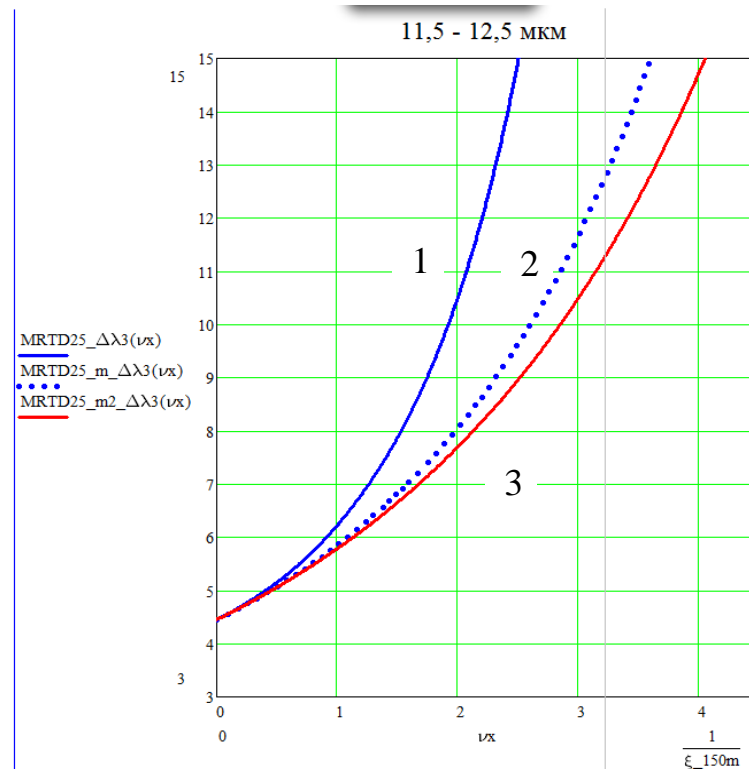
2 - для $k_{LSR} = 2$; 3 - для $k_{LSR} = 3$



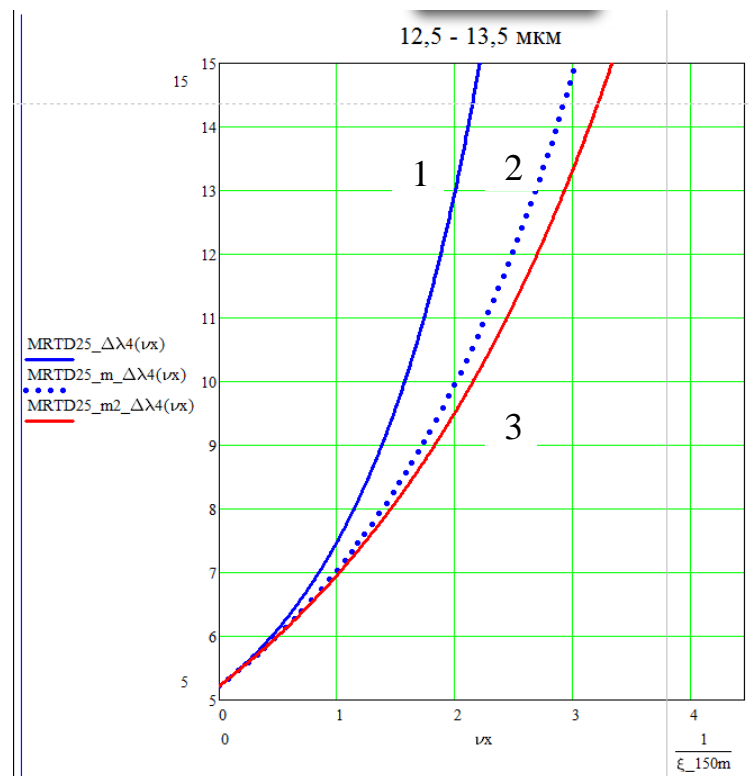
a)



б)



B)



Г)

Рис. 3.15. Графік залежності мінімальної роздільної різниці температур $MRTD(\nu_x)$ МБК від просторової частоти з субпіксельною обробкою

зображень: 1 – для $k_{ISR} = 1$; 2 – для $k_{ISR} = 2$; 3 – для $k_{ISR} = 3$, в робочих спектральних діапазонах:

а – (8,0 - 10,5) мкм; б – (10,5 - 11,5) мкм; в – (11,5 - 12,5) мкм; г – (12,5 - 13,5) мкм

З представлених графіків видно, що субпіксельна обробка з КЛПРЗ $k_{ISR} = 2$ дозволяє суттєво покращити характеристику МРРТ. На рис. 3.15 показано, що вплив субпіксельної обробки на МРРТ збільшується зі збільшенням просторової частоти, тобто зі зменшенням шпалі міри. При розділенні великих мір застосування субпіксельної обробки майже не здійснює впливу на значення МРРТ. При цьому застосування субпіксельної реєстрації з $k_{ISR} = 3$ надає незначне покращення за рахунок обмеження МПФ об'єктива.

Як відомо, роздільна здатність ІЧ камери визначається МПФ, яку забезпечує оптична система, з однієї сторони, та МПФ, яку забезпечує МПВ, з іншої. Оскільки об'єктив ІЧ камери є дифракційно обмеженим, то для спектрального діапазона (8 – 14) мкм значення діаметра кружка розсіювання змінюється від 19,5 мкм до 34,2 мкм. ПВ вибрано та узгоджено з об'єктивом таким чином, що розмір пікселя складає 25 мкм [44].

Враховуючи розподіл освітленості в плямі розсіювання, при застосуванні субпіксельної реєстрації зображень допустимим є підвищення лінійної роздільної здатності не більше, ніж в два рази. Підвищення лінійної роздільної здатності більше ніж в два рази за рахунок субпіксельної реєстрації зображень, не матиме змісту, оскільки роздільна здатність об'єктива виявиться недостатньою і не дозволить розділити отримані приймачем просторові частоти. Даний ефект спостерігається на графіках, приведених вище. Таким чином, в даному випадку вибирається значення КЛПРЗ $k_{ISR} = 2$, що відповідає зростанню роздільної здатності в $\sqrt{k_{ISR}} = 1,41$ рази.

Для забезпечення субпіксельної реєстрації зображення за рахунок власного руху супутника передбачено застосування повороту МПВ відносно напрямку руху КА. Розглянемо вплив такого повороту МПВ на МПФ МБМ та МПФ камери в цілому.

Наявність нахилу не впливає на просторову МПФ приймача, оскільки сигнал з пікселя пропорційний його площі, яка при повороті залишається незмінною [45], як видно з рис. 3.16, на якому представлено вигляд проекції одного пікселя при повороті та кілька рядків пікселів мікроболометричної матриці.

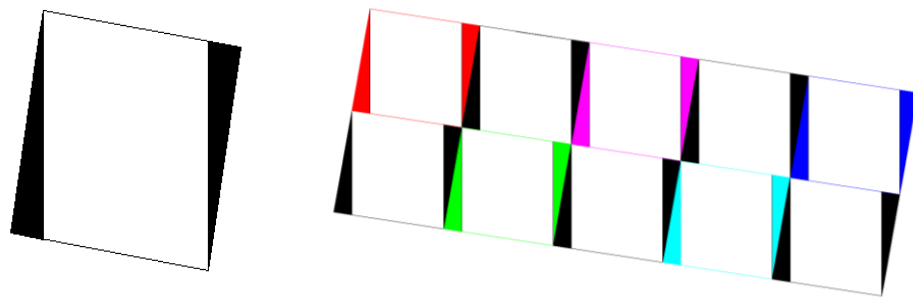


Рис. 3.16. Вигляд проекції пікселів на поверхні Землі при наявності повороту МБМ

Таким чином, формула просторової МПФ приймача з врахуванням еквівалентного субпікселя (3.29) залишається незмінною. Тоді для врахування впливу особливостей запропонованої технології субпіксельної реєстрації зображень врахуємо МПФ фази та МПФ зсуву при наявності повороту МПВ.

МПФ фази описує зміну контрасту на виході системи при зсуві об'єкту спостереження, ширина якого дорівнює проекції пікселя, вздовж однієї з осей. Вираз для визначення МПФ фази (3.32) приведено в [77]

$$M_{\phi}(v_x, \Delta y) = |\cos(2\pi v_x \Delta y)| \quad (3.32)$$

Розглянемо МПФ фази у напрямі вздовж рядків МБМ. Згадаємо, що сигнали з МБМ знімаються по рядках. Вираз МПФ фази зміниться через наявність кута повороту та прийме вигляд, представлений в (3.33).

$$M_{\phi}(v_x, v_y, \varphi) = \left| \cos(\pi v_x \alpha_D (tg(\varphi))) \right| \cdot \left| \cos(\pi v_y \alpha_D (tg(\varphi))) \right| \quad (3.33)$$

Розраховані МПФ фази для кутів повороту, представлених в табл. 3.1 для вибору режиму субпіксельної реєстрації на рис. 3.17. Для реалізації режиму субпіксельної реєстрації зображень в МБК вибрано режим, для якого значення кута $9,38^\circ$.

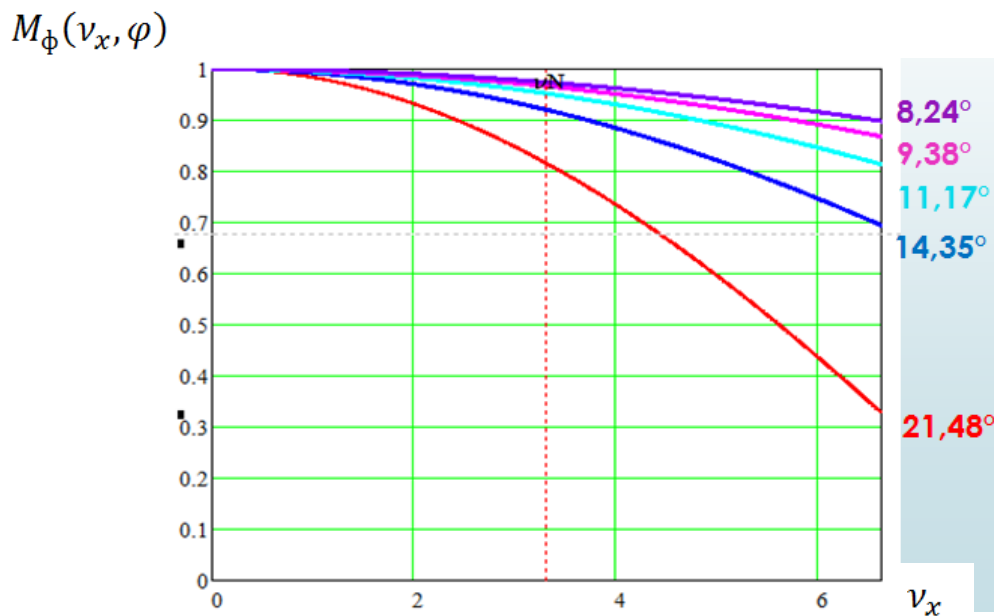


Рис. 3.17. Графік залежності МПФ фази від просторової частоти для різних значень кутів повороту МБМ

Також при застосуванні запропонованої технології субпіксельної реєстрації зображень необхідно оцінити вплив зсуву підсупутникової точки за час формування одного елементу за рахунок безперервного руху КА. Для цього застосуємо МПФ зсуву (3.34), яка буде діяти вздовж напрямку руху КА [51].

$$M_{СДВ}(v_y, \Delta Y) = \frac{\sin(\pi v_y \Delta Y)}{\pi v_y \Delta Y} ; \quad (3.34)$$

На рис. 3.18 представлена МПФ зсуву для значень зсувів, які відповідають 0,2, 0,3 та 0,5 проекцій пікселя на поверхні Землі.

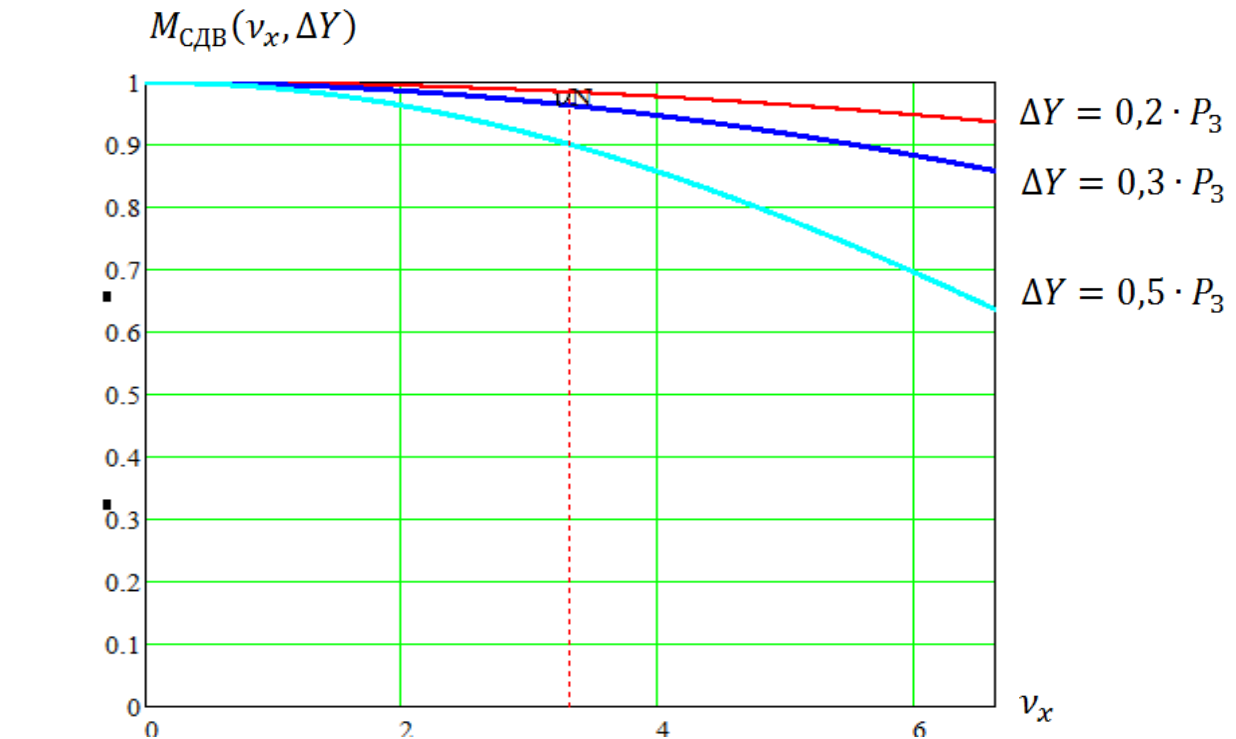


Рис. 3.18. Графік залежності МПФ зсуву від просторової частоти для значень зсувів ΔY , які відповідають 0,2, 0,3 та 0,5 проекцій пікселя на поверхні Землі.

Швидкість підсупутникової точки вздовж напрямку руху КА без врахування обертання Землі

$$V''_{п.т} = \frac{R_3 \cdot \sqrt{\mu_0}}{(R_3 + H)^{3/2}} = 6,811 \text{ км}$$

Відповідно до документації на МБМ максимальний час формування сигналу від рядка МБМ

$$t = 636 \cdot TMC = 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ с,}$$

де $TMC = 5,2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ (від англ. Time master clock).

За цей проміжок часу підсупутникова точка на поверхні Землі зміститься на 0,224 м, що складає незначну частину проекції пікселя на поверхні Землі. Тому складовою МПФ зсуву за рахунок руху супутника можна знехтувати.

3.4 Критерії ефективності субпіксельної обробки зображень

Для оцінювання алгоритмів відновлення при субпіксельній обробці зображень і умов їх ефективної дії необхідно розглянути методи їх оцінки. Така оцінка, однак, не є прямою за наступними причинами. По-перше, застосування тільки частотних методик не може забезпечити коректне оцінювання, оскільки вони не можуть відрізнити шумові ефекти на зображенні від деталей об'єкту. По-друге, більшість пакетів субпіксельної обробки застосовують додаткові методики покращення якості зображень, такі як придушення шумів і відновлення контурів. По-третє, єдине реальне зображення ВРЗ звичайно не доступне. Таким чином, оцінка відмінностей між зображенням ВРЗ, що оцінюється, і відповідним йому реальним зображенням не є прямою. По-четверте, через відновлення зображення при субпіксельній обробці на ньому можуть з'являтися артефакти, які завчасно невідомі, тому їх складно оцінити.

Розглянемо набір методик для оцінки алгоритмів відновлення зображень при субпіксельній обробці, описаних в сучасній літературі. Деякі з цих методик отримані в результаті обробки спеціальних (штучних) зображень. Інші працюють як із штучними, так і з зображеннями, отриманими реальними камерами. В результаті формується збалансований набір методик, які можуть використовуватися для оцінки роботи алгоритмів відновлення зображення при субпіксельній обробці.

Для оцінювання ефективності відновлення часто використовується декілька кількісних параметрів, таких як середньоквадратичне відхилення (СКВ, Mean squared error - MSE) і функція передачі модуляції (ФПМ, Modulation transfer function - MTF). Один з простіших методів – обчислити квадратний корінь з СКВ (Root mean square error - RMSE) між двома зображеннями. Проте, в такому випадку не завжди зрозуміло, яке зображення використовувати, оскільки є зображення ВРЗ, набір зображень НРЗ, іноді

навіть реальні зображення. Також часто використовують функції оцінки на базі ФПМ.

В [68] використовується нормоване СКВ (НСКВ, Normalized mean squared error - NMSE) між результатом обробки ВРЗ і відповідним реальним зображенням. Варто відмітити, що такий параметр враховує тільки інтенсивність на передньому плані, інтенсивність фону встановлюється рівною нулю.

$$NMSE = \frac{1/N \sum_{n=1}^N (z_{gt}(n) - z_{est}(n))^2}{\max(z_{gt})^2} \quad (3.35)$$

де N – кількість пікселів ВРЗ, z_{est} – оцінка впливу фону, z_{gt} – реальне зображення. Нормування здійснюється відносно квадрату максимального значення z_{gt} .

Слід відмітити, що загальна якість не може бути оцінена за результатом тільки однієї із запропонованих методик окремо, оскільки одна з величин може свідчити про артефакти замість задовільного зображення.

Оцінка мінімальної роздільної різниці температур. Ідея вимірювання МРРТ така ж, як і психофізичне вимірювання МРРТ приладів, тобто спостереження чотирьох шпальної міри. При цьому використовується вхідне зображення міри з чотирма штрихами з певною просторовою частотою. Приклади тестового і отриманих зображень представлені на рис. 3.19, 3.20. МРРТ вимірюється порівнянням сигналу з шумом:

$$MRTD = \frac{CTF}{N_s} = CTF \cdot SNR, \quad (3.36)$$

де CTF – функція передачі контрасту (ФПК, Contrast transfer function):

$$CTF = \max(S) - \min(S), \quad (3.37)$$

де $\max(S)$ – максимальне значення сигналу, $\min(S)$ – мінімальне значення сигналу, N_s – шумовий сигнал, SNR – відношення сигнал/шум.

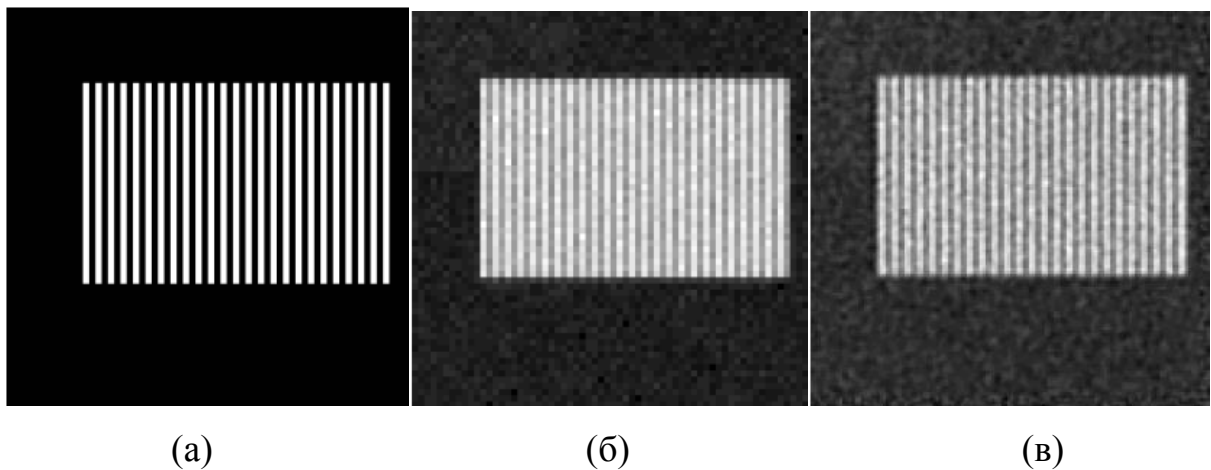


Рис. 3.19. Тестові зображення МРРТ:

- (a) – реальне зображення (ground truth image - GT);
- (б) – зображення НРЗ;
- (в) – зображення ВРЗ

Однією з переваг даного методу є те, що покращення оцінюється на конкретних частотах, тобто на частотах певних мір. В деяких випадках може вибиратися частота Найквіста для оцінки зображення НРЗ.

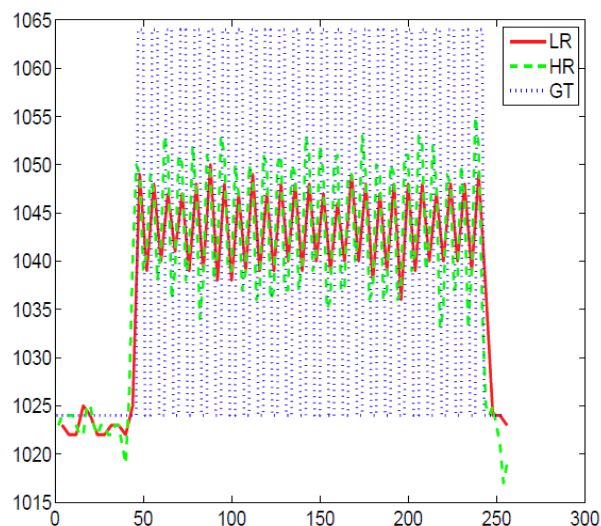


Рис. 3.20. Поперечний переріз МРРТ для зображень НРЗ (LR), зображень ВРЗ (HR) і реального зображення (GT)

Головним недоліком методу є те, що покращення оцінюється тільки для конкретних значень частоти, а для ретельного оцінювання необхідна

більша кількість мір. Значення МРРТ пропорційно відношенню сигнал/шум і обернено пропорційно часовому шуму [47]. Для зменшення МРРТ необхідно зменшити шум та збільшити ФПК.

Оцінка ФПМ. Для вимірювання ФПМ використовують зображення, що містить майже вертикальну лінію. Основна ідея полягає в тому. Що лінія представляє собою δ -функцію. Невеликий нахил використовується для отримання різних вибірок δ -функції, або, іншими словами, отримання множини накладених конфігурацій. Також на зображенні використовується додатковий елемент для оцінки руху [69]. На рис. 3.21 (а) представлено реальне зображення. Із використанням моделі камери з ефектом розмивання, врахуванням коефіцієнта заповнення приймача і часового шуму створюється декілька зображень НРЗ, одне з яких приведено на рис. 3.21 (б). Отримані зображення НРЗ відновлюються тим методом, який оцінюється. Приклад отриманого відновленого зображення представлено на рис. 3.21 (в). Всі три зображення (НРЗ, ВРЗ та реальне) використовуються для оцінки покращення ФПМ. Переріз реального зображення і зображень НРЗ і ВРЗ представлено на рис. 3.22. Швидке перетворення Фур'є (ШПФ) визначається для всіх ліній (по одній з координат) та усереднюються. Усереднені криві ШПФ приведені на рис. 3.22 (б). Після цього розраховується відношення ШПФ зображення НРЗ до ШБФ реального зображення та ШПФ зображення ВРЗ до ШПФ реального зображення. Приклад результату таких розрахунків представлено на рис. 3.22 (в).

За отриманими відношеннями визначається дві оцінки:

- відношення ФПМ для зображення ВРЗ до зображення НРЗ на певній частоті;
- значення частоти, що відповідає падінню ФПМ на 3 дБ для зображення ВРЗ і НРЗ.

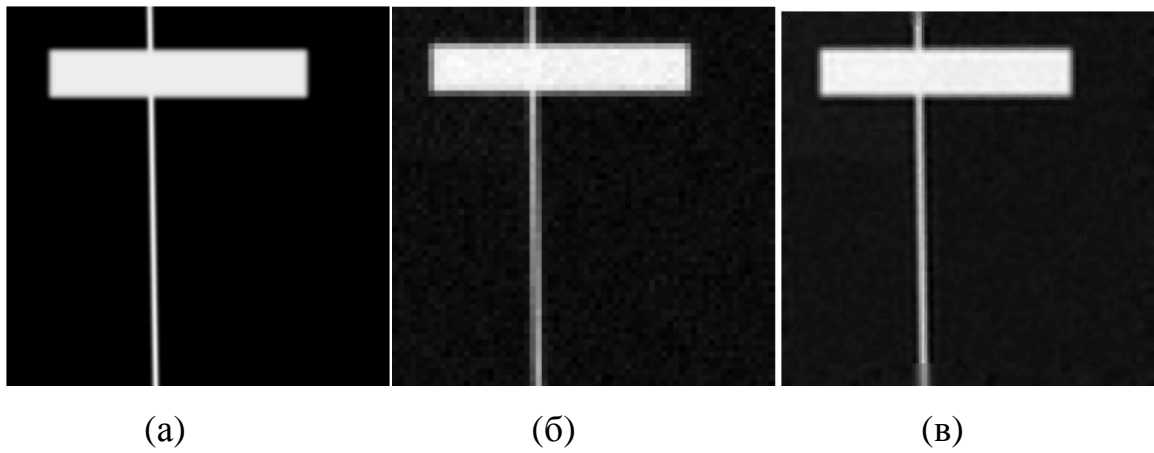


Рис. 3.21. Тестові зображення ФПМ

(а) – реальне зображення; (б) – зображення НРЗ; (в) – зображення ВРЗ

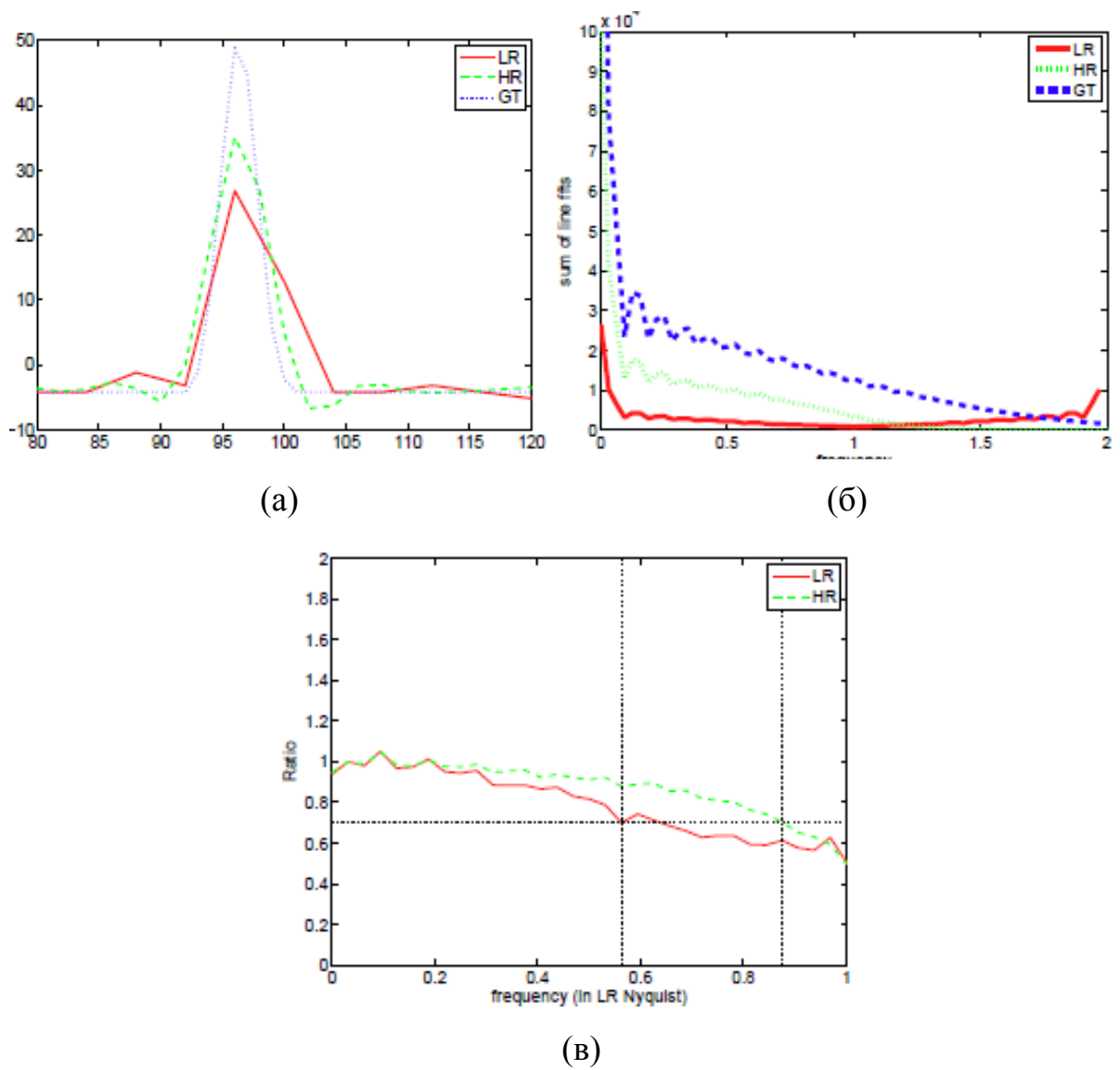


Рис. 3.22. Оцінювання ФПМ:

- (а) – переріз зображення однієї лінії для зображення НРЗ (LR), зображення ВРЗ (HR), і реального зображення (GT);
- (б) – сума БПФ по лініям;
- (в) – результуючі відношення (БПФ для НРЗ і БПФ для ВРЗ поділені на БПФ реальних зображень). Результат нормований до одиниці. Точка, що відповідає падінню на 3дБ, позначена перетином кривих нормованих БПФ і лінії рівня 0.707

Відношення сигнал/шум для зображень. Шум на зображенні визначається як стандартне відхилення на ділянках, де відсутні об'єкти спостереження [69]. При цьому вважається, що на цих ділянках через відсутність об'єктів всі коливання сигналу обумовлені шумами, а параметр стандартне відхилення дає змогу описати їх.

Коефіцієнт збільшення відношення сигнал/шум при умові, що рівень сигналу не змінюється, визначається наступним чином:

$$h = \frac{SNR_{HR}}{SNR_{LR}} = \frac{n_{HR}}{n_{LR}},$$

де

SNR_{HR} , SNR_{LR} – відношення сигнал/шум для зображень ВРЗ та НРЗ відповідно,

n_{HR} , n_{LR} – рівень шуму (стандартне відхилення коливань сигналу) на зображеннях ВРЗ та НРЗ відповідно. Більша величина коефіцієнту відповідає більш ефективній дії методу субпіксельної обробки зображення.

В цьому випадку можна використовувати такі ж зображення, як і для тесту на ФПМ (рис. 3.21), а саме їх нижню праву частину.

Тест переходу через контур. Зображення контуру може використовуватися для аналізу високочастотної складової ФПМ і для оцінки можливого оконтурювання або інших спотворень, що виникають при переході через границю перепаду інтенсивності. Даний метод надає можливість оцінювати ступінь спотворень, що виникають в результаті

застосування субпіксельної обробки при наявності різких перепадів інтенсивності. Метод проілюстровано рис. 3.23 на якому представлено вихідне зображення границі перепаду інтенсивності та отримане після обробки. З даного зображення можна визначити два коефіцієнта: коефіцієнт якості крутизни і коефіцієнт якості переходу. Коефіцієнт якості крутизни визначають за формулою [47]:

$$Q_{erf} = \frac{-2\beta}{\pi}$$

де

$$\beta = \arctg(0,85 \frac{a - b}{x_t - x_b})$$

Параметри x_t та x_b - просторові положення, які відповідають значенням інтенсивності $(\frac{a+b}{2} \pm 0,85 \frac{a-b}{2})$ в обробленому зображенні. Множник 0,85 означає, що x_t та x_b розміщені на рівні 85% від максимального та мінімального значень границь a та b .

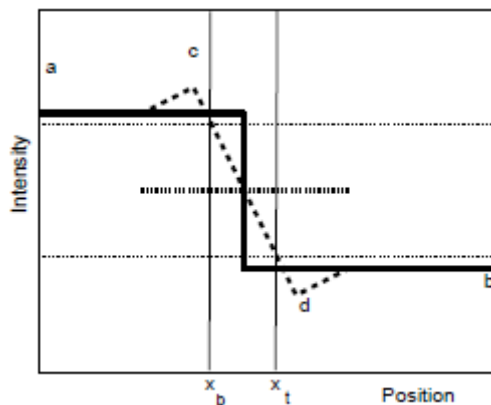


Рис. 3.23. Перепад інтенсивності для методу оцінки краю:

штрихова лінія – вихідна межа перепаду інтенсивності;

суцільна лінія – приклад перепаду на обробленому зображенні;

пунктирні лінії відповідають значенням інтенсивності $(\frac{a+b}{2} \pm 0,85 \frac{a-b}{2})$

Якість переходу визначається як:

$$Q_{over} = 1 - \frac{(c - a) + (b - d)}{2(a - b)}$$

Відповідно до визначення параметр якості переходу досягає одиниці, коли рівні a та c , з одного боку, та b і d , з іншого, співпадають. Вихідні зображення та переріз контуру представлені на рис. 3.24 і 3.25.

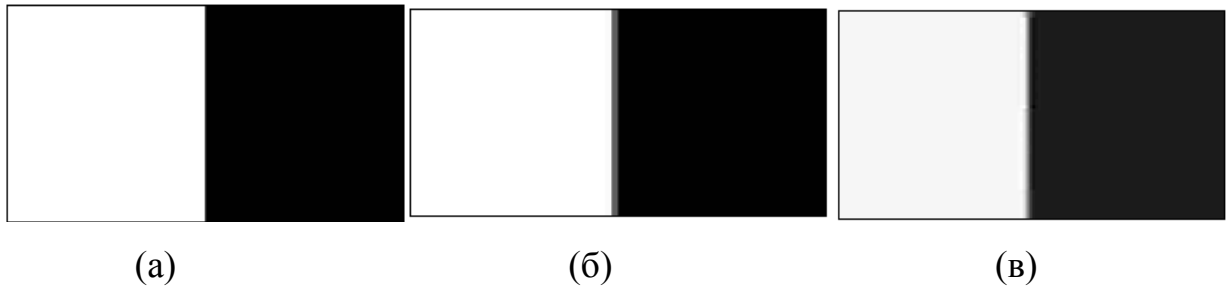


Рис. 3.24. Ілюстрація до тесту переходу границі перепаду інтенсивності

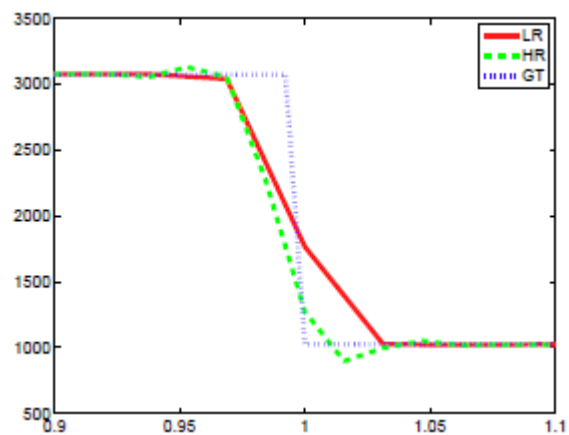


Рис. 3.25. Переріз границі перепаду інтенсивності

Висновки до розділу 3

1. Обґрунтовано застосування субпіксельної реєстрації зображень в МБК з метою підвищення просторової роздільної здатності за рахунок власного руху супутника та повороту МПВ відносно орбітального руху без конструктивних ускладнень.
2. Побудовано математичну модель реєстрації зображень із субпіксельним зміщенням в МБК, на основі якої розроблено методику розрахунку основних параметрів режиму субпіксельної реєстрації зображень.
3. В результаті дослідження впливу обертання Землі на застосування субпіксельної реєстрації зображень розроблено універсальний алгоритм розрахунку параметрів режиму субпіксельної реєстрації для зйомки місцевості на різній широті, який було втілено в розробленому програмному забезпеченні.
4. За допомогою розробленого програмного забезпечення проаналізовано велику кількість режимів субпіксельної реєстрації та вибрано параметри такого режиму субпіксельної реєстрації зображень, який забезпечує мінімальні значення похибок реєстрації і максимальну ефективність підвищення просторової роздільної здатності камери для заданих умов зйомки.
5. Аналіз розрахованих похибок субпіксельної реєстрації зображень показав, що найбільше значення приймають відхилення коефіцієнтів зміщення проекцій кадрів вздовж проекції стовпців МПВ, пов'язані зі зміною висоти польоту під час зйомки.
6. Внаслідок дослідження впливу застосування субпіксельної реєстрації зображень на просторову та енергетичну роздільну здатність виявлено, що застосування субпіксельної реєстрації зображень покращує роздільну здатність в середньому в 1.41 рази, при цьому на високих просторових частотах очікується більш суттєве підвищення.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ І ЕНЕРГЕТИЧНОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ МІКРОБОЛОМЕТРИЧНОЇ КАМЕРИ

4.1 Основні характеристики мікроболометричних камер для оцінки підвищення просторової і енергетичної роздільної здатності

Однією з основних узагальнених характеристик ІЧ систем є MRPT (Minimum Resolvable Temperature Difference – MRTD). Незважаючи на появу і розповсюдження таких удосконалених характеристик ІЧ камер як динамічна MRPT, мінімальна різниця температур для сприйняття *MTDP* (Minimum Temperature Difference Perceived) або функція порогу розпізнавання орієнтації трикутника *TOD* (Triangle Orientation Discrimination), які дозволяють позбавитися від недоліків MRPT, остання залишається на даний час найбільш надійним і стандартизованим способом оцінки та контролю функціонування ІЧ систем [47]. Функція MRPT дозволяє об'єднати просторове і енергетичне (температурне) розділення.

Іншою узагальненою характеристикою ІЧ систем є MBPT. Для вимірювання цих характеристик на стенді використовуються тест-об'єкти у вигляді круглих отворів різного діаметру та блока теплових мір з електронним блоком та програмним забезпеченням для виставки та контролю різниці температур та просторової частоти міри.

Тест-об'єкт для вимірювання MRPT – це 4-х штрихова міра Фуко, в якій штрихи і проміжки між ними мають однакову ширину $\zeta_{tp,x} = \omega_t$, а їх висота дорівнює $\zeta_{tp,y} = 7\omega_t$ (рис. 4.1). Штрихи і проміжки міри випромінюють як абсолютно чорне тіло з різною, але постійною температурою. Просторова частота $\nu_x = 1/2\omega_t$ вимірюється в кутових або лінійних величинах (частіше в мрад⁻¹ або мм⁻¹).

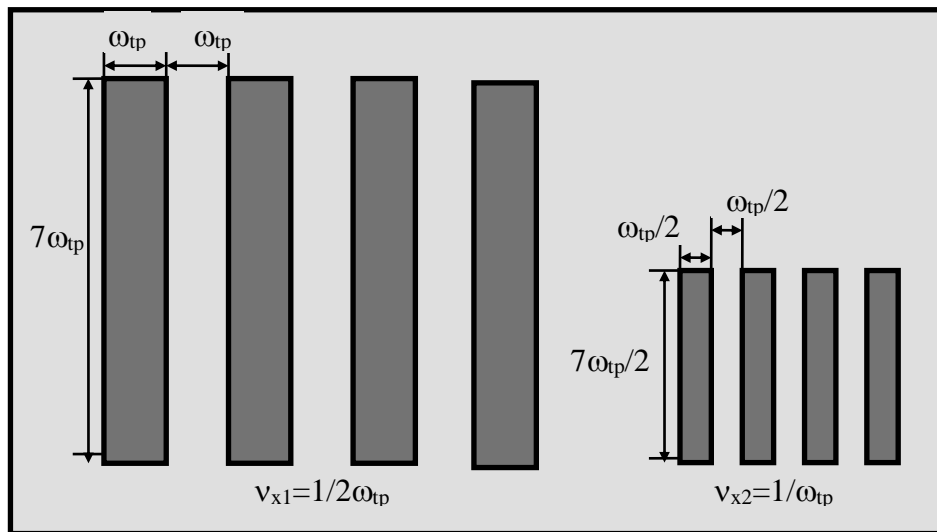


Рис. 4.1. Тест-об'єкт (міра Фуко) для визначення $MRTD(v_x)$

Для ІЧ камер аерокосмічного базування пропонується використовувати визначення $MPRT$ при аналізі електронного зображення міри Фуко за допомогою порогового пристрою [55]. Пороговий пристрій визначає наявність в зображенні міри Фуко, якщо сигнал від штрихів міри перевищує в SNR разів шуми зображення, де SNR (Signal Noise Ratio) – відношення сигнал/шум, яке залежить від ймовірності виявлення міри Фуко. Тому $MPRT$ може бути обчислена по формулі [54]

$$\Delta T = MRTD(v_x) = \frac{\pi}{4} SNR \frac{NETD}{M_s(v_x) \tau_o}, \quad (4.1)$$

де: $\pi/4$ – поправка, що враховує розклад Фур'є просторової функції випромінювання прямокутної міри Фуко; $SNR = 7,65$ – відношення “сигнал-шум”, необхідне для розпізнавання міри з ймовірністю виявлення $P = 0,9$; $NETD = 0,05$ К – ЕШРТ ПВ; $M_s(v_x)$ – модуляційна передавальна функція системи об'єктив – ПВ – електронний блок; τ_o – коефіцієнт пропускання об'єктива.

Таким чином оцінка впливу підвищення роздільної здатності МБК шляхом застосування субпіксельної реєстрації зображень на розглянуті характеристики МБК дозволить всебічно дослідити вибраний метод.

4.2 Стендове обладнання для вимірювання основних характеристик МБК

Стенд представляє собою апаратно-програмний комплекс, призначений для контролю об'єктів ІЧ камер та камер ІЧ діапазону. Принцип роботи стенду полягає в формуванні зображення тест-об'єкта в площині аналізу – площині зображення фотоприймального пристрою (при контролі об'єктів) або площині приймача зображення камери.

Для вимірювання функції передачі модуляції (ФПМ) об'єктиву використовується вузол тест-об'єкту з набором щілинних діафрагм. Аналіз зображення тест-об'єкту, сформованого об'єктивом здійснюється фотоприймальним блоком, який складається з ІЧ камери та мікроб'єктиву. Розрахунок ФПМ здійснюється на основі вимірних значень функції розсіювання лінії (ФРЛ). Функція передачі модуляції розраховується як модуль оптичної передавальної функції, яка в свою чергу, знаходиться за допомогою Фур'є-перетворення ФРЛ.

При контролі параметрів ІЧ камери:

- функції передачі модуляції (ФПМ);
- еквівалентної шуму різниці температур ЕШРТ, (NEDT);
- мінімальної виявлювальної різниці температур MBPT (MDTD);
- мінімальної роздільної різниці температур MPPT (MRTD)

використовується вузол теплових мір з набором наступних діафрагм:

- квадратної;
- круглої;
- шпальних мір Фуко.

Міри мають чорнену поверхню, температура мір дорівнює температурі навколишнього середовища. Безпосередньо за мірою встановлюється фоновий випромінювач у вигляді пласкої чорненої пластини. Температура випромінювача змінюється за допомогою елементів Пельтьє в більшу або меншу сторону відносно температури навколишнього середовища.

ЕШРТ визначається при аналізі сигналу від приймача зображення камери в зоні зображення квадратного отвору та поза зоною, МВРТ - в зоні зображення круглого отвору та поза зоною, МРРТ – за результатами аналізу контрасту зображення мір Фуко.

Структурно-функціональна схема апаратної частини стенду, представлена на рис.4.2, складається з наступних основних блоків:

- I. блока тест-об'єкту для контролю ФПМ об'єктивів ;
- II. блока тест-об'єкту для контролю ІЧ камери – вузла теплових мір;
- III. фотоприймального блока;
- IV. блока обробки і керування стендом.

До складу устаткування входить дзеркальний параболічний об'єктив 1 коліматору, який призначено для формування зображення тест-об'єкта, який розміщено в нескінченності, на вхідній зіниці об'єктиву камери. Об'єктив коліматору є поза осьовим фрагментом параболічного дзеркала. Для створення осесиметричної підсвітки дзеркала оптична вісь дзеркального конденсора 6 повернута відносно оптичної осі об'єктиву і проходить через центр щілинної діафрагми і центр світлової зони дзеркала.

Вузли стенду встановлюються на столику стенда, на якому розташований вузол дзеркального параболічного об'єктиву і вузол кріплення камери чи об'єктиву, що контролюється (встановлюється на поворотній рейці). За вузлом кріплення камери (об'єктиву), що контролюється, закріплюється трьохкоординатний столик з фотоприймальним блоком.

Конструкція вузла кріплення дозволяє встановлювати для контролю камери (об'єктиви), та забезпечує можливість їх нахилу в вертикальній площині. Для забезпечення контролю якості зображення в різних точках поля зору поворотна рейка з вузлом кріплення камери (чи об'єктиву), що контролюється, та фотоприймальним блоком (при контролі об'єктивів) повертається навколо вертикальної осі в діапазоні $\pm 40^\circ$. Ціна поділки шкали поворотної рейки в діапазоні кутів повороту $(0 \dots \pm 5)^\circ$ дорівнює $5'$, в діапазоні $\pm(5 \dots 40)^\circ$ - $15'$.

Блок тест-об'єкту для контролю ФПМ ІЧ об'єктивів. До складу даного блоку входять:

- джерело випромінювання – глобар (3), який формує пучок освітлення з заданими характеристиками – спектральним складом, геометричними параметрами і інтенсивністю. Живлення джерела здійснюється через понижуючий трансформатор від напруги $(220 \pm 22)\text{В}$;
- дзеркальний блок повороту зображення (4), який використовується для повороту зображення в межах $0 \dots 90^\circ$ і є дзеркальним аналогом призми Дове. Таким чином забезпечується можливість вимірювання ФПМ в сагітальній та меридіональній площинах;
- дзеркальний конденсор (6) - сферичне дзеркало - використовується для формування зображення джерела в площині щілинної діафрагми;
- набір світлофільтрів (7), призначений для формування заданої спектральної смуги випромінювання і ступінчатого ослаблення потоку випромінювання;
- набір щілинних діафрагм (8). Ширина щілинної діафрагми вибирається в залежності від діаметру вхідного отвору об'єктиву, що контролюється. Щілина встановлюється в фокальній площині об'єктиву коліматора (1) перпендикулярно або паралельно до його оптичної осі в залежності від площини вимірювання (сагітальної чи меридіональної).

Блок тест-об'єкту для контролю ІЧ камери. Даний блок призначений для контролю ЕШРТ, МВРТ, МРРТ камери з фокусною відстанню 112,8 мм та складається з:

- вузла теплових мір (9);
- фонового випромінювача (10) у вигляді мідної пластини, що нагрівається чотирма елементами Пельтьє;
- блока керування і реєстрації (БКР).

На мірах та фоновому випромінювачі закріплені датчики температури.

БКР здійснює керування напругою елементів Пельтьє та реєстрацію температури фонового випромінювача і міри. До складу БКР входять:

- блок живлення фонового випромінювача;

- контролер.

Змінні міри встановлюються і фіксуються в спеціальній рамці в двох ортогональних положеннях, для контролю якості зображення об'єктів в меридіональному і сагітальному перерізах. Площина рисунку змінних мір розташована перпендикулярно до оптичної осі об'єктиву коліматору.

Фотоприймальний блок. Фотоприймальний блок складається з тепловізійної камери Tau-320, змінних мікрооб'єктів і столика. Столик фотоприймального блоку закріплюється на трьохкоординатному столику стенду. Зображення щілини, сформоване об'єктивом камери, що контролюється, за допомогою мікрооб'єктива (12) із потрібним збільшенням переноситься до площини приймача випромінювання тепловізійної камери (13). Трьохкоординатний столик забезпечує точні прозовжні та поперечні переміщення для точного центрування площини приймача випромінювання відносно зображення тест-об'єкту та побудови кривих фокусування об'єктиву, що контролюється.

Блок обробки та керування. Блок обробки та управління складається з наступних основних частин:

- персональний комп'ютер (ПК);
- монітор;
- принтер.

В ПК вбудовано контролер, який забезпечує живлення та керування кроковими двигунами трьохкоординатного столика. Управління тепловізійною камерою та знімання інформації здійснюється інтерфейсом USB2.0. ПК пов'язаний з блоком керування та реєстрації теплових мір інтерфейсом USB2.0. Комп'ютер забезпечує обробку масива даних і представляє результати обробки в графічному та цифровому вигляді.

Операційна система комп'ютера та інтегровані програми обробки і керування надають користувачу меню з набором операцій, що забезпечують діалог з апаратурою.

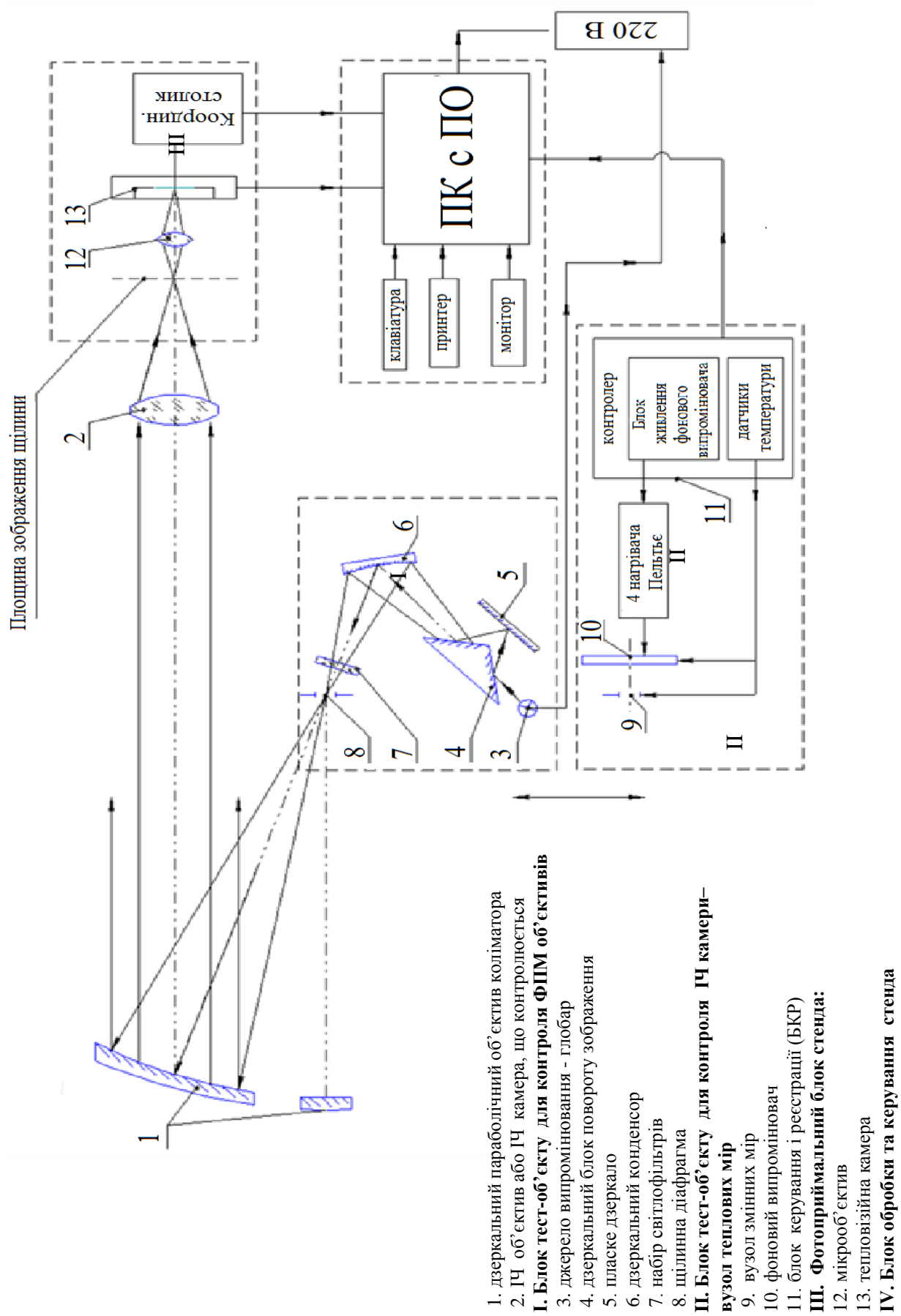


Рис. 4.2. Структурно-функціональна схема стенду

Вимірювання ФПМ об'єктиву. В якості джерела випромінювання використовується блок підсвічування щілини з підсвічуванням глобаром «Perkin Elmer», що працює від напруги (220 ± 22) В.

Тест-об'єкт для контролю об'єктивів встановлюється в положення для вимірювань в меридіональній площині (щілина розташовується вертикально). Щілина повертається на невеликий кут $\sim 5^\circ$ відносно вертикальної осі (при цьому щілина повинна освітлюватися джерелом повністю). Ширина щілини встановлюється рівною 0,4 мм.

Для заданого спектрального діапазону встановлюється необхідний світлофільтр. На фотоприймальному пристрої розміщується мікрооб'єктив із збільшенням 10^{\times} . Зображення щілини фокусується за допомогою поздовжньої переміщення столика, після чого проводяться вимірювання ФПМ.

Для отримання достовірної ФПМ необхідно використовувати весь діапазон градацій яскравості, але не допускати насичення в максимумі.

Далі необхідно визначити площину найкращої установки та виміряти значення ФПМ для позаосьових точок поля зору об'єктиву. Для цього, поворотна рейка стенду разом з об'єктивом, що контролюється, та фотоприймальним пристроєм послідовно встановлюються по черзі в кожне з кутових положень відповідно до оптичної схеми об'єктиву, що контролюється. Після повороту рейки фото приймальний пристрій переміщується на каретці до суміщення предметної площини мікрооб'єктиву з площиною зображення об'єктиву, що контролюється. Для вимірювання ФПМ об'єктиву в сагітальній площині щілина повертається на 90° навколо оптичної осі.

Вимірювання еквівалентної шуму різниці температур ЕШРТ. Для вимірювання ЕШРТ температура в процесі роботи забезпечується на рівні $22 \pm 2^\circ\text{C}$. Блок теплових мір встановлюється на посадкове місце тест-об'єкту для контролю ФПМ об'єктивів на стенді (робоча поверхня змінної міри після установки в рамці повинна знаходитися в фокальній площині об'єктиву

коліматора). Змінна міра з квадратним отвором зі стороною 25 мм встановлюється в рамку, при цьому полірована поверхня без захисного покриття розташовується з боку фонового випромінювача, а поверхня з чорним покриттям – з боку об'єктиву камери.

МБК встановлюється на блоці кріплення камери, що контролюється, при цьому центр зображення отвору міри на контрольному моніторі пристрою зв'язку з камерою розташовується в центрі приймальної матриці МБК. Різниця температур між вузлом міри та фоновим випромінювачем встановлюється рівною $\Delta T_1 \approx -5^\circ\text{C}$. При цьому температура фонового випромінювача повинна бути нижчою за температуру навколишнього середовища. Значення температури фонового випромінювача T_1 фіксується. Послідовно знімається 64 кадри з приймача випромінювання МБК. Розраховується середнє значення сигналу U_{i1} для кожного i -го пікселя зображення отвору міри за виключенням крайових зон з 5 пікселів. Різниця температур між вузлом міри та фоновим випромінювачем встановлюється $\Delta T_0 \approx 0$. Послідовно знімається 128 кадрів з приймача зображення МБК. Після цього розраховується середньоквадратичне значення сигналу шуму фотоприймальної матриці камери в області зображення отвору міри для кожного пікселя U_{is} за виключенням крайових зон з 5 пікселів.

Далі різниця температур між вузлом міри і фоновим випромінювачем встановлюється рівною $\Delta T_2 \approx +5^\circ\text{C}$. При цьому температура фонового випромінювача повинна бути вище за температуру навколишнього середовища. Значення температури фонового випромінювача T_2 фіксується. Послідовно знімається 64 кадри з приймача зображення МБК. Розраховується середнє значення сигналу U_{i2} для кожного i -го пікселя зображення за виключенням крайових зон з 5 пікселів.

ЕШРТ розраховується для кожного пікселя за формулою

$$\text{NETD}_i = (T_2 - T_1) \cdot U_{is} / (U_{i2} - U_{i1}). \quad (4.2)$$

Після цього розраховується середнє значення ЕШРТ МБК.

Вимірювання мінімальної виявлювальної різниці температур МВРТ. Для вимірювання МВРТ необхідно встановити змінну міру з круглим отвором діаметром 25 мм в рамку для установки змінних мір. Температура фонового випромінювача встановлюється на $1..2^{\circ}\text{C}$ нижче за температуру міри. Температура фонового випромінювача повільно підвищується.

Спостерігаючи на контрольному моніторі зображення міри в «оберненому» контрасті, оператор фіксує різницю температур ΔT_1 між температурами фонового випромінювача та міри, за якої на зображенні міри зникає зображення отвору. Продовжуючи спостереження, оператор також фіксує і різницю температур ΔT_2 , що відповідає появі зображення отвору на зображенні міри.

МВРТ розраховується за формулою:

$$\text{MDTD} = (\Delta T_1 + \Delta T_2) / 2 \quad (4.3)$$

Аналогічно проводяться вимірювання для міри с діаметром отвору 10 мм.

Вимірювання мінімальної роздільної різниці температур МРРТ. Для вимірювання МВРТ необхідно почергово встановлювати чотирьохшпальні міри Фуко з відповідною просторовою частотою в рамку для установки змінних мір.

При цьому, спостерігаючи на контрольному моніторі пристрою зв'язку з МБК зображення отворів міри в «оберненому» контрасті, оператор вимірює температуру фонового випромінювача та міри і фіксує різницю цих температур в той момент, коли зображення шпал міри вже не можливо спостерігати окремо.

За отриманими точками різниці температур для мір з різною просторовою частотою будуються МРРТ.

Втім, для попередньої експериментальної перевірки впливу застосування субпіксельної реєстрації зображень на характеристики МБК на базі розглянутого стенду було створено стенд для вимірювання основних характеристик МБК із застосуванням субпіксельної реєстрації зображень.

4.3 Стендове обладнання для вимірювання основних характеристик МБК при субпіксельній реєстрації зображень.

Було розроблено стенд для вимірювання основних характеристик МБК (рис. 4.3 та 4.4), який вміщує [78]: 1) пристрій формування теплових полів; 2) дзеркальний коліматор; 3) ІЧ об'єktiv; 4) блок фотоприймального пристрою на базі болометричної матриці; 5) електронний блок формування зображення; 6) персональний комп'ютер; 7) монітор; 8) прецизійний столик з мікроподачами по трьом осям.

Принцип роботи стенда полягає в формуванні зображення тест-об'єкта в площині аналізу - фоточутливій площині фотоприймального пристрою. В якості тест-об'єкта для вимірювання МРРТ застосовують міри Фуко, які мають чорну поверхню, що випромінює з температурою, яка дорівнює температурі навколишнього середовища.

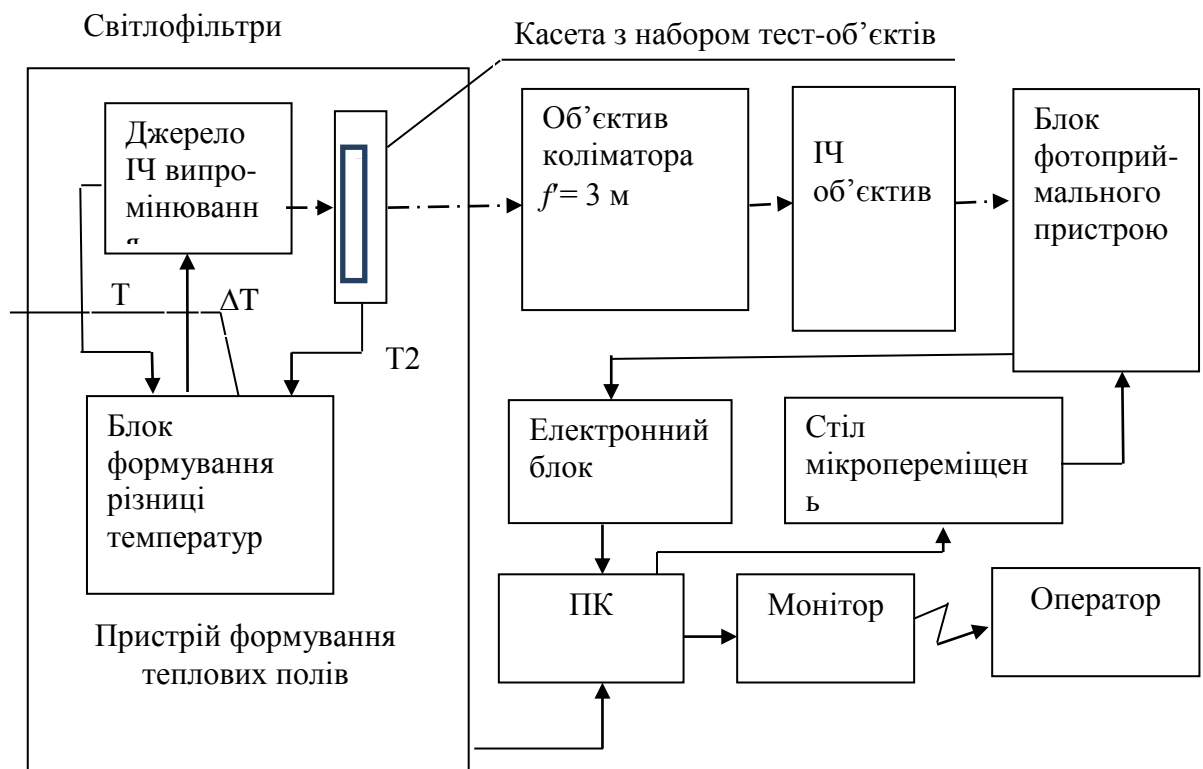


Рис. 4.3. Блок-схема стенду вимірювання характеристик ІЧ-камери

Безпосередньо за мірою розташовано фоновий випромінювач у вигляді

пластини з міді з чорною поверхнею, що випромінює з температурою, яка може змінюватися за допомогою чотирьох елементів Пельтьє в більшу або меншу сторону відносно температури навколишнього середовища. На фоновій пластині та мірах розташовані температурні датчики, які з'єднані з електронним блоком формування різниці температур, за допомогою якого задається необхідний температурний контраст ΔT між фоном та мірою. Керування електронним блоком та контроль температури ведеться за допомогою спеціального програмного забезпечення через персональний комп'ютер. Похибка вимірювання різниці температур ΔT складає $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$.

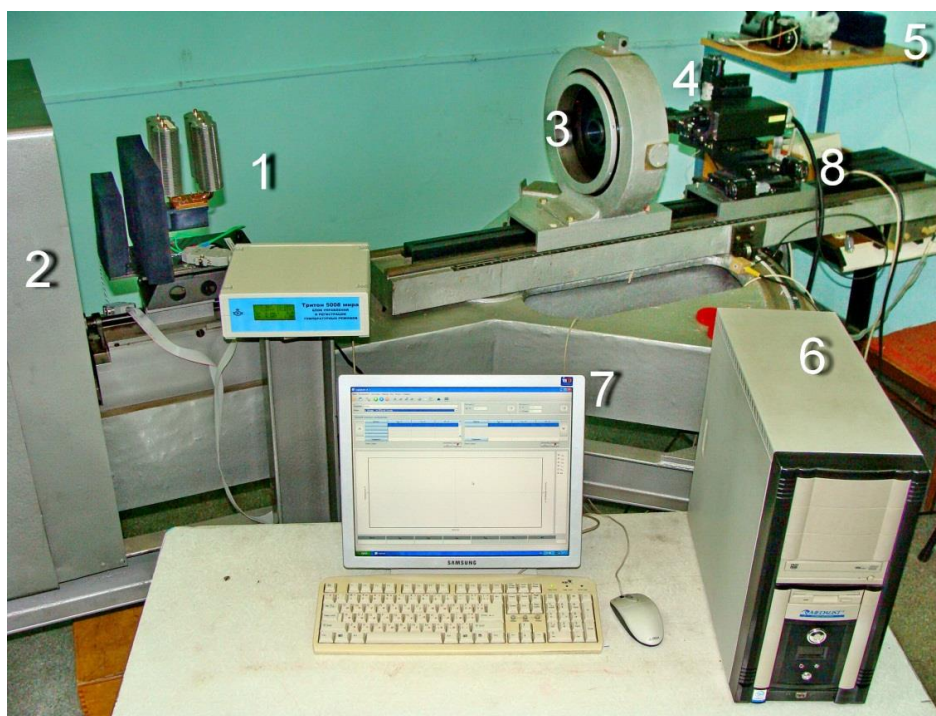


Рис. 4.4. Стенд вимірювання характеристик ІЧ-камери

Між фоновим випромінювачем і тест-об'єктом розташовуються інтерференційні світлофільтри, які формують заданий спектральний діапазон.

Теплові міри Фуко розташовуються в фокальній площині позаосьового параболічного дзеркального коліматора з фокусною відстанню $f' = 3011\text{ мм}$ [26]. Дзеркальний коліматор на вхідній зіниці ІЧ об'єктива формує

зображення теплових мір в нескінченності.

Після дзеркального коліматора встановлюється об'єктив, який моделює об'єктив МБК. В якості об'єктива МБК для експериментальних досліджень використовувався об'єктив з наступними параметрами [66]:

- фокусна відстань – 102,7 мм;
- відносний отвір – 1:1,37;
- робочий спектральний діапазон – $\Delta\lambda = 8 \dots 14$ мкм;
- поле зору – $2\omega = 11^\circ$;
- коефіцієнт передачі контраста на частоті Найквіста – не менше ніж 0,42.

ІЧ об'єктив створює зображення теплових мір Фуко в своїй фокальній площині, в якій розташовується площа фоточутливих елементів фотоприймального пристрою – ІЧ камери Tau 320 47320001X-SPNLX з болометричною матрицею 320×256 пікселів розміром 25×25 мкм [39]. Температурна чутливість ІЧ камери, яка виражається ЕШРТ дорівнює $NETD = 0,05$ К.

Фотоприймальний блок кріпиться до прецизійного трьохкоординатного столика фірми Standa, який може переміщати фотоприймальний блок по трьом осям з кроком 1 мкм. Це дозволяє точно центрувати болометричну матрицю відносно зображення теплових мір, а також, встановлювати площину фоточутливих елементів фотоприймального блоку в площину зображення ІЧ об'єктиву.

Аналоговий сигнал з фотоприймального пристрою поступає в електронний блок формування зображення, який формує цифрове зображення теплових мір, та передає його в персональний комп'ютер. Отримані цифрові зображення теплових мір спостерігаються на моніторі персонального комп'ютера.

Методика отримання кадрів для експериментальних досліджень підвищення просторової роздільної здатності камери [78]:

1. В фокальній площині дзеркального коліматора розміщується міра Фуко

із заданою просторовою частотою.

2. За допомогою блока формування різниці температур задається необхідна різниця температур ΔT між мірою та фоном.
3. За допомогою переміщень прецизійного трьохкоординатного столика площину фоточутливих елементів фотоприймального блоку встановлюють в площину зображення ІЧ об'єктиву, контролюючи зображення на екрані монітору.
4. Проводиться реєстрація першого кадру (а) при поперечних зміщеннях трьохкоординатного столика відносно оптичної осі $\Delta X = \Delta Y = 0$ мкм.
5. За командами з персонального комп'ютера трьохкоординатний столик переміщає фотоприймальний блок по осям X і Y на величину $\Delta X = \Delta Y = 12$ мкм.
6. Проводиться реєстрація другого кадру (б) при поперечних зміщеннях трьохкоординатного столика, а відповідно і болометричної матриці відносно оптичної осі та зображення (а) на $\Delta X = \Delta Y = 12$ мкм.
7. За командами з персонального комп'ютера трьохкоординатний столик переміщав фотоприймальний блок по осям X і Y на величину $\Delta X = \Delta Y = 15$ мкм.
8. Проводиться реєстрація третього кадру (в) при поперечних зміщеннях трьохкоординатного столика, а відповідно і болометричної матриці відносно оптичної осі та зображення (а) на $\Delta X = \Delta Y = 15$ мкм.
9. Міра виймається з касети та реєструється кадр (г) із зображенням фону.
10. В фокальній площині дзеркального коліматора розміщується та ж сама міра Фуко. За допомогою блока формування різниці температур задається інша різниця температур ΔT між мірою та фоном.
11. Повторюються дії пунктів 4-9 для різних температурних контрастів ΔT між мірою та фоном.
12. В фокальній площині дзеркального коліматора розміщується міра Фуко з іншою просторовою частотою.

13. Повторюються дії пунктів 2-12.

Для отримання достатньої кількості точок для побудови кривої МРРТ *MRTD* (ν_x) вимірювання проводилися на шістьох мірах Фуко. Просторова частота мір була підібрана таким чином, щоб контролювалися просторові частоти, як нижчі за частоту Найквіста МБМ, так і вище. Для об'єктива з фокусною відстанню $f'_0=102,7$ мм и дзеркального коліматора з фокусною відстанню $f'_K=3011$ мм розмір зображення однієї шпали міри можна обчислити за формулою

$$\omega'_t = \omega_t \frac{f'_0}{f'_K}, \quad (4.1)$$

де ω_t – розмір однієї шпали міри, а просторова частота в зображенні міри дорівнює $\nu_x = 1/2\omega'_t$. В таблиці 4.1. наведено розміри мір, їх зображення, просторова частота в площині аналізу, та її відношення до частоти Найквіста ν_N .

Таблиця 4.1

Розміри мір Фуко та їх просторова частота в площині аналізу

Позначення міри	ω_t , мм	ω'_t , мм	ν_x , мм ⁻¹	ν_x/ν_N
СТ1 СДИК 1-33	2,67	0,091	5,5	0,27
ПР5-121-1-01	1,825	0,062	8,0	0,40
СТ1 СДИК 1-05	1,34	0,046	10,9	0,55
ПР5-121-1-02	0,95	0,032	15,4	0,77
СТ1 СДИК 1-02	0,54	0,018	27,1	1,36
СТ1 СДИК 1-01	0,46	0,0157	31,9	1,59

Дослідження по визначенню МВРТ проводилися на двох тест-об'єктах у вигляді мір із круглими отворами діаметром $\varnothing_1 = 10$ мм та $\varnothing_2 = 25$ мм. В

таблиці 4.2 наведені розміри отворів, їх зображення, просторова частота в площині аналізу, та її відношення до частоти Найквіста ν_N .

Методика отримання кадрів для визначення МВРТ ідентична до описаної вище методики з тою різницею, що фіксувалися зображення як з додатною різницею температур між фоном та тест-об'єктом, так і з від'ємною.

Таблиця 4.2

Розміри отворів тест-об'єктів та їх просторова частота в площині аналізу

Позначення міри	\varnothing , мм	\varnothing' , мм	ν_x , мм ⁻¹	ν_x/ν_N
СТ1 СДИК СБ 1-32	10,0	0,341	1,47	0,073
СТ1 СДИК СБ 1-09	25,0	0,852	0,59	0,029

Для формування одного з вузьких спектральних діапазонів використовується світлофільтр [26].

Методика калібровки полягає в зйомці протяжного об'єкту в різних спектральних діапазонах для 6 різних температур фонового випромінювача: $T_1 = 15^\circ$; $T_2 = 17,5^\circ$; $T_3 = 20^\circ$; $T_4 = 22,5^\circ$; $T_5 = 25^\circ$; $T_6 = 27,5^\circ$

4.4 Результати експериментальних досліджень

Експериментальне дослідження проводилося з метою підтвердження можливості підвищення просторової роздільної здатності ІЧ камери шляхом обробки двох зміщених один відносно одного зображень, та визначення величини можливого підвищення просторової роздільної здатності. Для визначення МРРТ МБК без субпіксельної реєстрації зображень та із застосуванням субпіксельної реєстрації зображень проводилася реєстрація цих зображень при різному температурному контрасті. Зображення різних мір при різних температурних контрастах наведено в таблиці Д.1 додатку Д.

Отримані зображення були показані декільком спостерігачам, які вказували зображення, на якому можна було розрізнити чотири шпали міри. МРРТ для кожної з мір отримувалась, як середня різниця температур для зображень, які вибрали спостерігачі. Отримані результати МРРТ за аналізом зображень мір з різною просторовою частотою, очікувані теоретичні значення МРРТ по формулі (4.1) без субпіксельної обробки та апроксимовані значення МРРТ за результатами аналізу зображень після субпіксельної обробки зведені в таблиці 4.3. та наведені на рис. 4.4.

Таблиця 4.3

Вплив субпіксельної реєстрації зображень на МРРТ МБК

$\nu_x, \text{мм}^{-1}$	ν_x / ν_N	<i>MRTD</i> , К			
		Без субпіксельної реєстрації		Із субпіксельною реєстрацією	
		Теоретична	Експеримент.	Теоретична	Експеримент
5,5	0,27	0,50	0,50	0,49	0,40
8,0	0,4	0,57	0,60	0,55	0,55
10,9	0,55	0,70	1,00	0,70	0,80
15,4	0,77	1,0	1,20	0,80	0,80
27,1	1,36	3,1	3,00	1,70	1,80
31,9	1,59	6,0	5,00	2,10	2,00

Як видно з приведених даних, за рахунок обробки двох зображень, які зміщені один відносно одного на певну частину пікселя по двом осям, відбувається підвищення просторової роздільної здатності системи при одному і тому ж температурному контрасті тест-об'єкта.

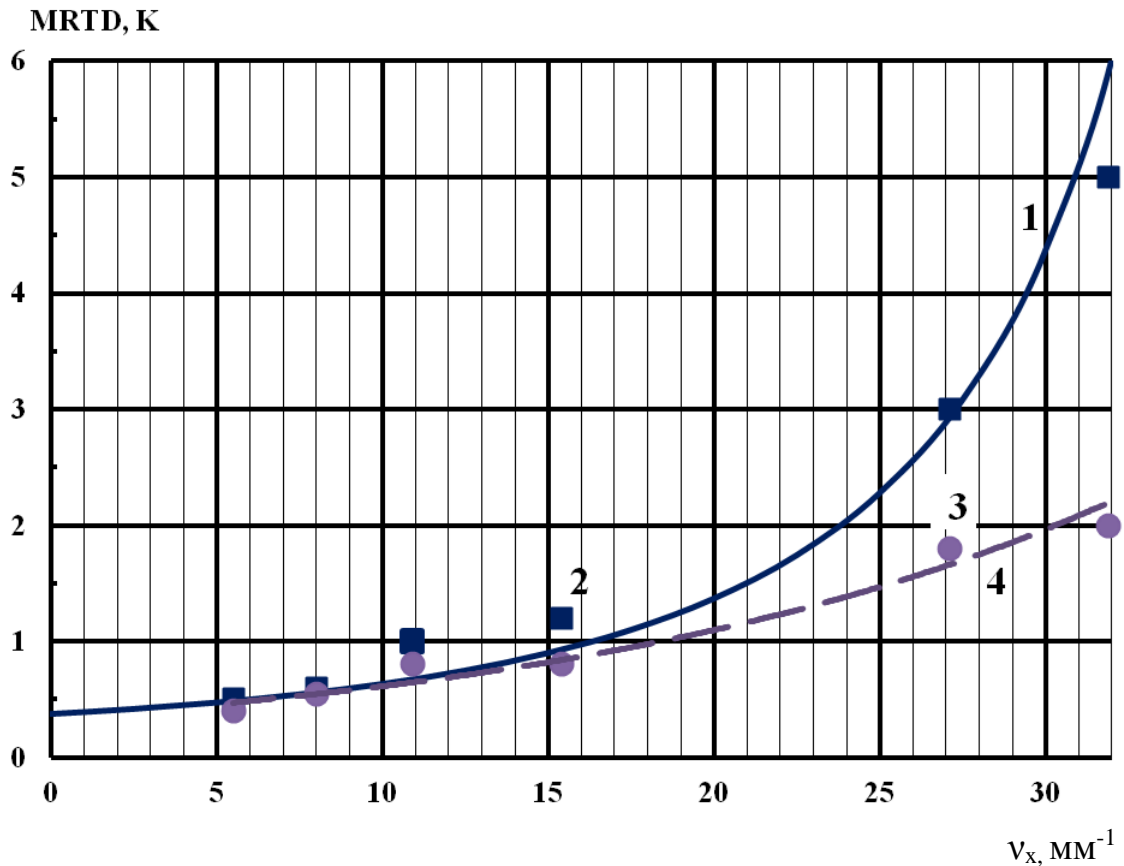


Рис.4.4. Графіки залежності $MRTD (v_x)$ об'єктива з мікроболометричною матрицею:

- 1 – без субпіксельної реєстрації зображень (теоретичні значення);
- 2 – без субпіксельної реєстрації зображень (експериментальні значення);
- 3 – із субпіксельною реєстрацією зображень (експериментальні значення);
- 4 – із субпіксельною реєстрацією зображень (теоретичні значення)

За результатами експериментів були побудовані залежності підвищення просторової роздільної здатності при застосуванні субпіксельної реєстрації зображень від температурного контрасту (рис. 4.5) та зменшення значень МРРТ при субпіксельній реєстрації зображень від просторової частоти (рис. 4.6).

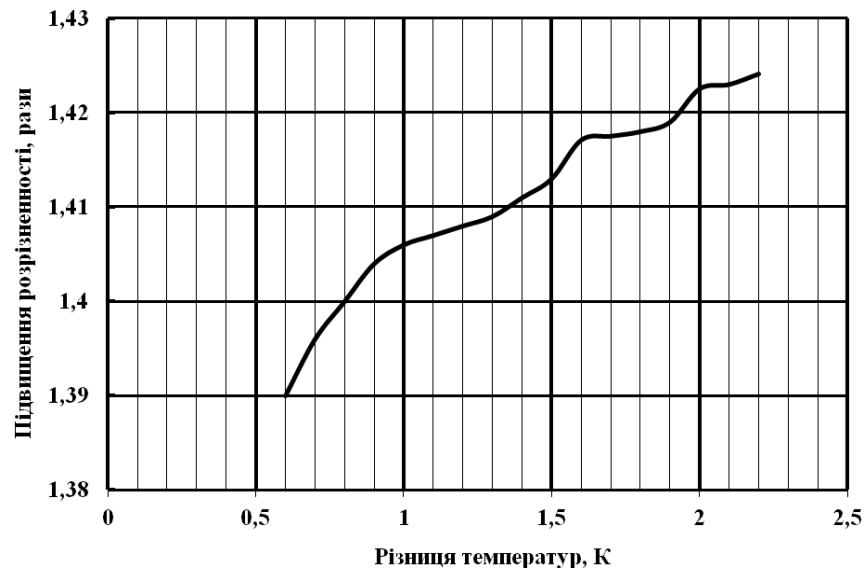


Рис. 4.5. Підвищення просторової роздільної здатності при субпіксельній реєстрації в залежності від температурного контрасту (за результатами експериментів)

Як видно з рис. 4.5. середнє значення підвищення просторової роздільної здатності при субпіксельній обробці складає 1,41 рази, тобто $\sqrt{2}$.

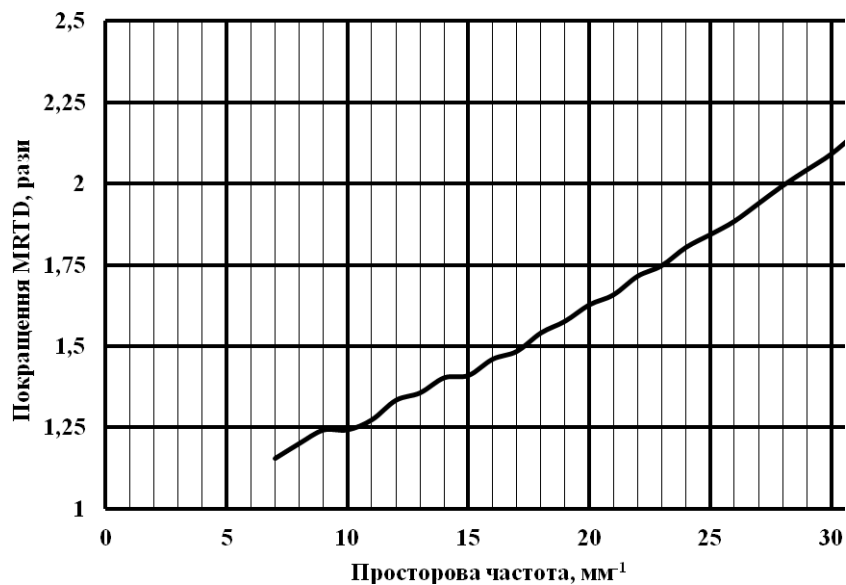


Рис. 4.6. Покращення MRPT при субпіксельній реєстрації в залежності від просторової частоти (за результатами експериментів)

Відповідно до рис. 4.6 покращення енергетичної роздільної здатності в діапазоні робочих просторових частот досягає двох.

Для визначення MBPT МБК без субпіксельної реєстрації зображень та з її застосуванням проводилася реєстрація цих зображень при різному температурному контрасті. Зображення для двох тест-об'єктів та різних температурних контрастів наведено в таблиці Д.2 додатку Д. Зменшення MBPT при застосуванні субпіксельної реєстрації зображень є незначним, що пов'язано з тим, що розмір отворів тест-об'єктів відповідає низьким просторовим частотам $\nu_{x1} = 0,029\nu_N$, $\nu_{x2} = 0,073\nu_N$. Таким чином, така узагальнена характеристика як MBPT не дозволяє всебічно оцінити вплив застосування субпіксельної реєстрації зображень на МБК.

Також проводились експериментальні дослідження субпіксельної обробки зображень з метою підтвердження теоретичної величини підвищення просторової роздільної здатності ІЧ камери шляхом обробки двох зміщених один відносно одного зображень в кожному робочому спектральному діапазоні з використанням декількох зображень фону у відповідності до певних температур (без зйомки кадру з фоном кожного разу) [28]. Для виявлення MPRT камери без субпіксельної обробки зображення і за допомогою обробки двох зображень, що зміщені один відносно одного по двом координатам на визначену частину пікселя, проводилася реєстрація цих зображень при різній різниці температур в кожному зі спектральних діапазонів. Вимірювання MPRT камери проходили наступним чином.

Спочатку здійснювалася зйомка протяжної поверхні при 6 різних температурах з використанням фільтру з відповідним спектральним діапазоном. Отримані таким чином кадри були використані при застосуванні програми субпіксельній обробки як кадр із зображенням фону. Такий підхід дозволяє провести експериментальні дослідження наближені до реальних умов роботи МБК космічного базування, коли під час польоту не вистачає часу на зйомку третього кадру із зображенням фону [66].

Далі проводилася зйомка мір наступних просторових частот з використанням кожного спектрального фільтру для різних значень різниці температур без зсуву та із зсувом відносно зображення міри: $\nu_1 = 0,27\nu_N$; $\nu_2 = 0,4\nu_N$; $\nu_3 = 0,54\nu_N$; $\nu_4 = 0,77\nu_N$. Для кожного значення ΔT отримувалося два кадри: кадр без зміщення $\Delta X = \Delta Y = 0$ та кадр із зміщенням $\Delta X = \Delta Y = 12$ мкм. До отриманих в різних спектральних діапазонах кадрів застосовувалася субпіксельна обробка, результати якої представлено в додатку Д (в таблиці Д.3 надано вихідні зображення без субпіксельного зміщення, які візуально не відрізняються від кадрів із зміщенням).

Отримані зображення були показані декільком спостерігачам, які вказували зображення, на якому можна було розпізнати чотири шпали міри. МРРТ для кожної з мір отримувалась, як середня різниця температур для зображень, які вибрали спостерігачі. Отримані результати по розділенню зображень мір з різною просторовою частотою спостерігачами, очікувані теоретичні значення МРРТ по формулі (4.1) без застосування субпіксельної реєстрації зображень та із застосуванням реєстрації, а також значення МРРТ за результатами розділення зображень спостерігачами після субпіксельної обробки зведені в таблицю 4.4. та наведені на рис.4.7.

Таблиця 4.4

Вплив субпіксельної реєстрації зображень на МРРТ МБК в різних спектральних діапазонах.

ν_x , мм ⁻¹	ν_x/ν_N	МРРТ, К $\Delta\lambda = 8 - 13$ мкм				МРРТ, К $\Delta\lambda = 8 - 10$ мкм			
		Без субпіксельної реєстрації		Із субпіксельною реєстрацією		Без субпіксельної реєстрації		Із субпіксельною реєстрацією	
		Теорет.	Експер.	Теорет.	Експер.	Теорет.	Експер.	Теорет.	Експер.
5,5	0,27	1	1	1	1	2,7	1,5	2,6	1,5
8,0	0,4	1,2	1,5	1,15	1,5	3,1	3	2,9	3
10,9	0,55	1,5	1,5	1,3	1,5	3,7	4	3,4	3,5
15,4	0,77	2	2	1,7	1,5	5,1	5	4,2	4

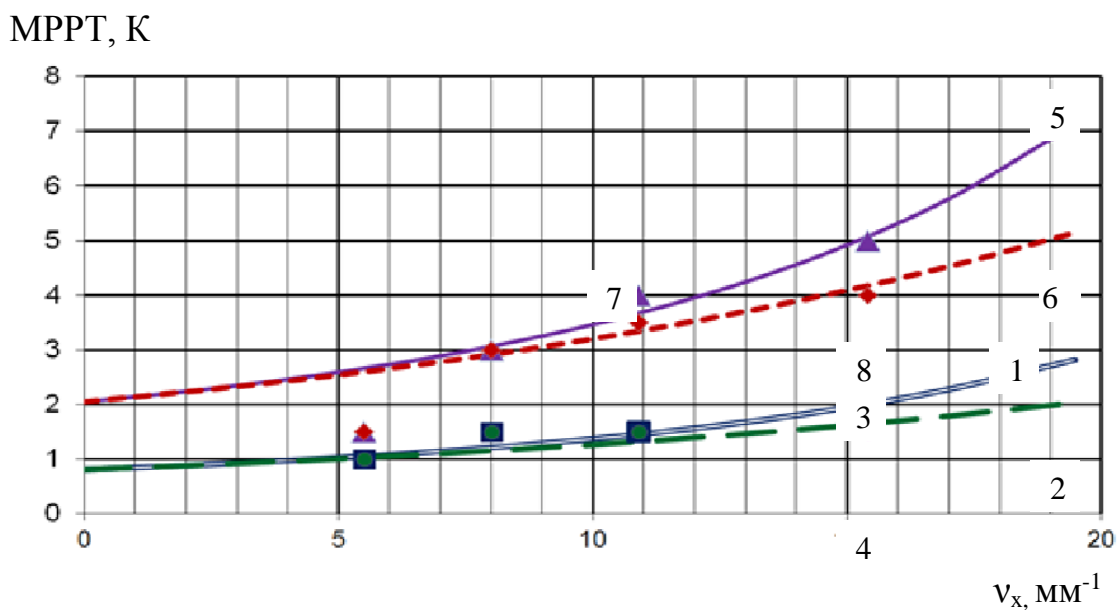


Рис. 4.7. Експериментальні та теоретичні залежності МРРТ МБК
від просторової частоти:

- 1 – без субпіксельної реєстрації зображень (теоретичні значення, спектральний діапазон 8 – 13 мкм);
- 2 – із субпіксельною реєстрацією зображень (теоретичні значення, спектральний діапазон 8 – 13 мкм);
- 3 – без субпіксельної реєстрації зображень (експериментальні значення, спектральний діапазон 8 – 13 мкм);
- 4 – із субпіксельною реєстрацією зображень (експериментальні значення, спектральний діапазон 8 – 13 мкм);
- 5 – без субпіксельної реєстрації зображень (теоретичні значення, спектральний діапазон 8 – 10 мкм);
- 6 – із субпіксельною реєстрацією зображень (теоретичні значення, спектральний діапазон 8 – 10 мкм);
- 7 – без субпіксельної реєстрації зображень (експериментальні значення, спектральний діапазон 8 – 10 мкм);
- 8 – із субпіксельною реєстрацією зображень (експериментальні значення, спектральний діапазон 8 – 10 мкм).

Як видно з приведених даних, за рахунок субпіксельної реєстрації зображень відбувається підвищення просторової роздільної здатності системи при одному і тому ж температурному контрасті тест-об'єкта.

Неявне підвищення роздільної здатності пов'язане з використанням мір великого розміру, а на малих просторових частотах, які даним мірам відповідають, вплив субпіксельної обробки знижується. Втім, отримані результати вимірювання МРРТ узгоджуються із змодельованими функціями залежності МРРТ від просторової частоти. При цьому спостерігається підвищення роздільної здатності в середньому 1.4 рази при застосуванні субпіксельної реєстрації зображень, як і в попередньому дослідженні.

Погіршення якості ІЧ зображень спричинено використанням вузького спектрального діапазону та поглинанням випромінювання матеріалами фільтрів. Якщо врахувати дискретність різниці температур, при якій відбувалася зйомка, загальні закономірності підвищення просторової роздільної здатності зберігаються для досліджуваних спектральних діапазонів.

Таким чином експериментальні дослідження МРРТ ІЧ камери свідчать, що при застосуванні субпіксельної обробки двох кадрів, отриманих субпіксельною реєстрацією в декількох спектральних діапазонах, відбувається підвищення роздільної здатності зображення на очікуваному в результаті математичного моделювання рівні, тобто в середньому в 1.4 рази. Застосування при субпіксельній обробці зображень фону лише для кількох значень температури, які можна отримати при калібруванні камери в польоті (що відповідає умовам експлуатації МБК), є достатнім для ефективного підвищення роздільної здатності.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено стендове обладнання для проведення експериментальних досліджень субпіксельної реєстрації зображень, яке дозволяє реалізувати субпіксельні зміщення та вимірювати МРРТ МБК.
2. Розроблено методику експериментального дослідження процесу підвищення просторової роздільної здатності за рахунок субпіксельної реєстрації зображень. Створено модель камери із реєстрацією зображень із субпіксельними зміщеннями в польоті та визначено вплив застосування субпіксельної реєстрації на характеристики камери.
3. Експериментальні дослідження МРРТ камери показали, що в панхроматичному спектральному діапазоні (8,0 - 13,5) мкм та одному з робочих діапазонів камери (8,0 - 10,5) мкм, відбувається підвищення роздільної здатності зображення на очікуваному в результаті математичного моделювання рівні, тобто в середньому в 1.4 рази.
4. Експериментальні дослідження МВРТ камери показали, що застосування субпіксельної реєстрації зображень призводить до незначного підвищення просторової роздільної здатності МБК на низьких просторових частотах.
5. На основі експериментальних досліджень МРРТ в панхроматичному спектральному діапазоні показано, що найзначніше підвищення просторової та енергетичної роздільної здатності при застосуванні реєстрації зображень із субпіксельними зміщеннями відбувається на високих просторових частотах, які відповідають дрібним деталям зображення.
6. При висоті орбіти 668 км крок точок зображення на поверхні Землі дорівнює 148,1 м. За рахунок субпіксельної реєстрації зображень і наступної їх обробки забезпечується підвищена просторова роздільна здатність МБК не гірше за 105 м.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена наукова задача підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери (МБК) для супутника без введення до приладу додаткових пристроїв шляхом обробки субпіксельно зміщених зображень за рахунок власного руху носія знімальної апаратури.

При виконанні дисертаційної роботи здобувачем були отримані такі наукові результати:

7. Порівняльний аналіз технічних характеристик існуючих МБК виявив, що роздільна здатність існуючих ІЧ камер не відповідає значенням, необхідним для рішення багатьох задач ДЗЗ, тому проблема підвищення просторової роздільної здатності камер є актуальною.
8. Дослідження узагальненої математичної моделі МБК із врахуванням параметрів об'єкту, фону, оптичної системи та приймача випромінювання показало, що розглянута камера забезпечує виявлення об'єктів розміром 200 м на поверхні Землі (при висоті орбіти 668 км) з температурним контрастом від 0,3 К (панхроматичний спектральний канал) до 3 К (спектральний канал 12,5 – 13,5 мкм). Тобто просторова роздільна здатність не є достатньою для вирішення задач ДЗЗ.
9. Побудовано математичну модель процесу субпіксельної реєстрації зображень в МБК, що дозволяє врахувати параметри зйомки та параметри камери. На основі побудованої математичної моделі розроблено методику розрахунку основних параметрів режиму субпіксельної реєстрації зображень. Дослідження впливу обертання Землі на застосування субпіксельної реєстрації зображень дозволило розробити універсальний алгоритм розрахунку параметрів режиму субпіксельної реєстрації для зйомки місцевості на різній широті, який було втілено в розробленому програмному забезпеченні. За допомогою розробленого програмного забезпечення проаналізовано велику кількість

режимів субпіксельної реєстрації та вибрано параметри такого режиму субпіксельної реєстрації зображень, який забезпечує мінімальні значення похибок реєстрації і максимальну ефективність підвищення просторової роздільної здатності камери для заданих умов зйомки.

10. В результаті дослідження впливу застосування субпіксельної реєстрації зображень на просторову та енергетичну роздільну здатність встановлено залежності просторової та енергетичної роздільної здатності камери від параметрів режиму субпіксельної реєстрації в різних спектральних діапазонах. Виявлено, що застосування субпіксельної реєстрації зображень покращує роздільну здатність в середньому в 1.41 рази, при цьому на високих просторових частотах очікується більш суттєве підвищення.
11. Результати експериментальних досліджень підтверджують підвищення просторової роздільної здатності камери за рахунок реєстрації субпіксельно зміщених зображень. Відбувається підвищення роздільної здатності зображення на очікуваному в результаті математичного моделювання рівні, тобто в середньому в 1.4 рази. При висоті орбіти 668 км для обраних параметрів камери крок точок зображення на поверхні Землі дорівнює 148,1 м. За рахунок субпіксельної реєстрації зображень і наступної їх обробки забезпечується підвищення просторової роздільної здатності щонайменше на 33% (відповідає кроку точок зображення на поверхні Землі не більше за 105 м).
12. Отримані результати було впроваджено на КП СПБ «Арсенал» при проектуванні та створенні дослідного зразка сканера дальнього інфрачервоного діапазону для космічного апарату «Січ-2М».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Accetta S.J. The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook. vol. 5. Stephen B. Campana Passive Electro-Optical Systems / S. Joseph Accetta, David Shumaker L. // Infrared Search and Track Systems. – Infrared Information Analysis Center Environmental Research Institute of Michigan. – 2005. – 296 p.
2. Alam M. S. Infrared Image Registration and High Resolution Reconstruction Using Multiple Translationally Shifted Aliased Video Frames / M.S. Alam, J.G. Bogner, R.C. Hardie // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 49. – 2000. – P. 915-923.
3. Bose N. Recursive total least squares algorithm for image reconstruction from noisy undersampled frames / N. Bose, H. Kim, H. Valenzuela // Multidimensional Systems and Signal Processing, 4. –1993. – P. 253-268.
4. Chan F. Tony Superresolution Image Reconstruction Using Fast Inpainting Algorithms / F.T. Chan, K.N. Michael, C.Y. Andy // Applied and Computational Harmonic Anal., vol. 23, Issue 1, Special Issue on Mathematical Imaging. – 2007. – P. 3-24.
5. Chrzanovski K. Testing Thermal Imagers. Practical guidebook / K. Chrzanovski. – Military University of Technology, Warsaw. – 2010. – 164 p.
6. Duan Y. Classical imaging theory of a microlens with super-resolution / Y. Duan, G. Barbastathis, B. Zhang // Optics Letters. – 2013. – Vol.38. – No.16. – P. 2988-2990.
7. Eun S.L. Regularized Adaptive High-Resolution Image Reconstruction Considering Inaccurate Subpixel Registration / Sil Lee Eun, Gi Kang Moon // IP(12), No. 7. – July 2003. – P. 826-837.
8. Farsiu S. A fast and robust framework for image fusion and enhancement / S. Farsiu / Ph.D. Dissertation. – Santa Cruz: UCSC. – 2005. – 171 p.

9. Farsiu S. Multi-frame demosaicing and super-resolution from under-sampled color images / S. Farsiu, M. Elad, P. Milanfar // Proc. of the 2004 IS&T/SPIE Symp. on Electronic Imaging, vol. 5299. – Jan. 2004. – P. 222–233.
10. Farsiu S. Robust shift and add approach to superresolution / S. Farsiu, D. Robinson, M. Elad, P. Milanfar // Proc. SPIE Conf. Applications of Digital Signal and Image Processing, San Diego, CA. – Aug. 2003. – P. 121–130.
11. Farsiu S., Robinson D., Elad M., and Milanfar P. Fast and robust multi-frame superresolution / S. Farsiu, D. Robinson, M. Elad, P. Milanfar // IEEE Trans. Image Processing, vol. 13. – Oct. 2004. – P. 1327–1344.
12. Gillespie A. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images / A. Gillespie, S. Rokugawa, A.B. Kahle // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1998. – Vol. 36. – No.4. – P.1113-1126.
13. Gregory D. D. Apparatus and method for providing optical sensors with super resolution / D.D. Gregory // US patent US6240219 B1. – 2001. – 18 p.
14. Holst G.C. Electro-optical imaging system performance / G.C. Holst. – JCD Publishing, Winter Park, Florida USA. – 2000. – 454 p.
15. Huanfeng S. Super-Resolution Reconstruction Algorithm To MODIS Remote Sensing Images / Shen Huanfeng, K. Ng Michael, Li Pingxiang // Comput. J. (52): 90-100 – 2009.
16. Kharitonenko E.V. Image Resolution Enhancement in IR Device With Focal Plane Array / E.V. Kharitonenko, V.G. Kolobrodov, N.I. Lykholit, V.M. Tiagur // 13-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science : Scientific Works, 25-28 October 2012. – Kyiv, Ukraine. – P. 168.
17. Kim S., Su W. Recursive high-resolution reconstruction of blurred multiframe images / S. Kim, W. Su // IEEE Trans. on Image Proc., 2. – 1993. – P. 534-539.

18. Kolobrodov V.G Calculation model for optoelectronic remote sensing system's radiometric resolution at arbitrary viewing angles / V. G. Kolobrodov, M. I. Lykholit, V. I. Mykytenko, V. M. Tiagur, K. V. Dobrovolska // Visnyk NTUU "KPI". Seria Radiotekhnika. Radioapparatobuduvannia. – 2017. – №69. – p. 30-34
19. Labonté G. Infrared Target-Flare Discrimination using a ZISC Hardware Neural Network / G. Labonté, W.C. Deck // Military & Aerospace Electronics. – 2009.
20. Latry C. Staggered arrays for high resolution earth observing systems / C. Latry // Proc. of SPIE Earth Observing Systems XIV. – Vol. 7452, 74520O. – 2009.
21. Lyalko V.I. Subpixel processing of images from the frame infrared camera for future Ukrainian remote sensing satellite system / V.I. Lyalko, M.A. Popov, S.A. Stankevich, S.V. Shklyar, N.I Likholt, V.M. Tyagur, C.V. Dobrovolska // Proceedings of the Tenth International Conference on Digital Technologies (DT'2014). – Žilina: University of Žilina, 2014. – P. 232-235.
22. Lyalko V.I. Prototype of satellite infrared spectroradiometer with superresolution / V.I. Lyalko, M.A. Popov, S.A. Stankevich, S.V. Shklyar, V.N. Podorvan, N.I. Likholt, V.M. Tiagur, C.V. Dobrovolska // Journal of Information, Control and Management Systems. – 2014. – Vol.12. – No.2. – P. 153-164.
23. Nguyen N. Numerical algorithms for image superresolution / N. Nguyen // PhD Dissertation in Scientific computing and computational mathematics, July 2000. – 168 p.
24. Niklaus F. MEMS-based uncooled infrared bolometer arrays, review / F. Niklaus, C. Vieider, H. Jakobsen // Proceedings of the SPIE. – 2007. – Vol.6836. – P. 683-690.
25. Park S.C. Super-resolution image reconstruction, technical overview / S.C. Park, M.K. Park, M.G. Kang // IEEE Signal Processing Magazine. – 2003. – Vol.20. – No.3. – P. 21-36.

26. Popov M.A. Functional model of the new multiband infrared radiometer for “Sich” Earth observation satellite system / M.A. Popov, V.M. Tyagur, S.A. Stankevich, S.V. Shklyar, C.V. Dobrovolska // 14-та Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 8-12 вересня 2014 р. – Київ, 2014. – С.72.
27. Shin J.H. Adaptive image sequence resolution enhancement using multiscale decomposition based image fusion / J.H. Shin, J.S. Yoon, J.K. Paik // Vol. 11. – P. 204-218.
28. Stankevich S.A. Accuracy Improvement Of The Land Surface Physical Paramemers Estimation By Infrared Satellite Imaging / S.A. Stankevich, V.M. Tiagur, C.V. Dobrovolska, N.S. Lubsky // Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 24-28 серпня 2015 р. – Київ, 2015. – С. 212.
29. Tissot J.L. IR detection with uncooled focal plane arrays. State-of-the-art and trends / J.L. Tissot // Opto-electronics review. – 2004. – №12(1). – P. 105-109.
30. Vandewalle P. Superresolution images reconstructed from aliased images / P. Vandewalle, S. Süsstrunk, M. Vetterli // Proceedings of the SPIE. – 2003. – Vol.5150. – P. 1398-1405.
31. Wexler H. The effects of electronic microscanning on infrared image aliasing and spatial resolution / H. Wexler. – Massachusetts Institute of Technology Department of Electrical Engineering and Computer Science – 1995.
32. Wolf W.L. Introduction to Infrared System Design / W.L. Wolf. – SPIE Optical Engineering Press. – 1996. – 132 p.
33. Барский А.Г. Оптико-электронные следящие системы : учеб. пособие / А.Г. Барский. – М.: Университетская книга; Логос 2009. – 113 с.
34. Блажевич С.В. Синтез космического изображения с улучшенной разрешающей способностью на основе субпиксельного сканирования / С.В. Блажевич, В.Н. Винтаев, Н.Н. Ушакова // Современные проблемы

- дистанционного зондирования Земли из космоса. – Т.7. № 2. – 2010. – С. 9-13.
35. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений : пер. с англ. / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005 – С. 327-350.
 36. Грузман И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых. – Новосибирск: НГТУ, 2002. – 352 с.
 37. Даниленко А.Н. Обобщенные характеристики инфракрасных систем поиска и слежения с матричными приемниками излучения / А.Н. Даниленко, В.Г. Колобродов, Е.В. Харитоненко // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2011. – №3. – С.5-19.
 38. Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення понять / ДСТУ 4220:2003.- К.: Держспоживстандарт України. – 15.09.2003.
 39. Добровольська К.В. Експериментальні дослідження мінімальної роздільної різниці температур тепловізійної камери із субпіксельною обробкою зображень / К.В. Добровольська, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // XVI Міжнародна науково-практична конференція «Людина і космос» : збірник тез, 9 - 11 квітня 2014 р. – Дніпропетровськ, 2014.
 40. Добровольська К.В. Математичне моделювання тепловізійного приладу спостереження з мікроболометричною матрицею / К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – НТУУ «КПІ». – 2014. – Вип.48(2). – С. 28-38.
 41. Добровольська К.В. Математична модель тепловізійної камери космічного базування із субпіксельною реєстрацією зображень» / К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // 14-та Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 8-12 вересня 2014 р. – Київ, 2014 – С.74.
 42. Добровольська К.В. Реалізація субпіксельної реєстрації зображень для підвищення просторової роздільної здатності дистанційної зйомки /

- К.В. Добровольська, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур, М.О. Попов, С.А. Станкевич // XVI Міжнародна науково-практична конференція «Людина і космос» : збірник тез, 9 - 11 квітня 2014 р. – Дніпропетровськ, 2014.
43. Добровольська К.В. Реалізація субпіксельної реєстрації зображень ІЧ камери ДЗЗ та експериментальні дослідження підвищення просторової роздільної здатності / К.В. Добровольська, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.О. Попов, С.А. Станкевич // Українська науково-технічна конференція «Авіакосмічне приладобудування» : тези доповідей, 10-11 грудня 2014 р. – Київ, 2014. – с. 47-50.
 44. Добровольская Е.В. Исследование влияния параметров микролометрических матриц на характеристики ИК камер космического базирования / Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов, В.М. Тягур // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» : збірник тез доповідей, 22-23 квітня 2015 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2015. – С. 69-70.
 45. Добровольская Е.В. Модуляционная передаточная функция микролометрической матрицы при использовании субпиксельной регистрации изображений / Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов, В.М. Тягур // Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 22-27 серпня 2016 р. – Київ, 2016. – С. 195.
 46. Добровольская Е.В. Основные характеристики ИК камер для решения задач ДЗЗ / Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит, В.М. Тягур // XIII науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і перспективи” : збірник тез доповідей, 23-24 квітня 2014 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2014. – С. 47.
 47. Добровольская Е.В. Оценка качества восстановленного изображения, полученного в результате субпиксельной обработки / Е.В. Добровольская // XIII науково-технічна конференція

- Приладобудування: стан і перспективи” : збірник тез доповідей, 23-24 квітня 2014 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2014. – С. 48.
48. Кашкин В.Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений : учебное пособие / В.Б. Кашкин, А.И. Сухинин. – М: Логос. – 2001. – 264 с.
 49. Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов М.Л. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды : учеб. пособие для вузов / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.
 50. Колобродов В.Г. Застосування методів і алгоритмів цифрової обробки зображень в оптико-електронних приладах / В.Г. Колобродов, К.В. Харитоненко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – НТУУ «КПІ». – 2010. – Вип.40. – С. 23-31.
 51. Колобродов В.Г. Лінійна роздільна здатність на місцевості космічних оптико-електронних систем дистанційного зондування / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // Наукові вісті НТТУ “КПІ”. – 2007. – №4 – С. 95-100.
 52. Колобродов В.Г. Математична модель сканера дальнього інфрачервоного діапазону / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур, К.В. Харитоненко // V науково-практична конференція “Погляд у майбутнє приладобудування” : збірник тез доповідей, 24-25 квітня 2012 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2012. – С.78.
 53. Колобродов В.Г. Методы повышения пространственного разрешения тепловизионных камер с матричными приемниками излучения / В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко // Озброєння і військова техніка. – 2014. – №3. – С. 56-62.
 54. Колобродов В.Г. Мінімальна розділювана різниця температур тепловізора космічного базування / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // Космічна наука і технологія. – 2014. – Т. 20. – №1. – С. 23-27.

55. Колобродов В.Г. Проекування тепловізійних і телевізійних систем спостереження : підручник / В.Г. Колобродов, М.І Лихоліт. – К.: НТУУ «КПІ». – 2007. – 364 с.
56. Колобродов В.Г. Субпіксельна обробка інфрачервоних космічних зображень з метою підвищення їх роздільної здатності / В.Г. Колобродов, Н.І. Лихолит, В.М. Тягур, К.В. Харитоненко // XI науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і перспективи” : збірник тез доповідей, 24-25 квітня 2012 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2012. – С. 53-54.
57. Колобродов В.Г. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проєкування і контролю, застосування) : підручник / В.Г. Колобродов, Н. Шустер. – К.: Тираж, 1999.– 340 с.
58. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л.З. Криксунов. – М.: Советское радио, 1978.– 400 с.
59. Крылов А.С. Компьютерное повышение разрешения изображений с использованием методов математической физики / А.С. Крылов, А.В. Насонов. – М: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011.– 72 с.
60. Лагутин А.А. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности / А.А. Лагутин, Ю.А. Никулин, А.П. Жуков // Вычислительные технологии. – 2007. – Т.12. – № 2. – С. 67-89.
61. Лазарев Л.П. Инфракрасные и световые приборы самонаведения и наведения летательных аппаратов / Л.П. Лазарев. – М.: Машиностроение, 1970. – 540 с.
62. Лихолит Н.И. ИК-камера космического базирования с микроболометрической матрицей / Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції “Авіа-2013”, Том 4, 21-23 травня 2013 р. – Київ, 2013. – С. 27.41-27.44.

63. Лихолит Н.И. Методы компьютерного повышения разрешения инфракрасных изображений для решения задач дистанционного зондирования Земли / Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2013» Том 4, 21-23 травня 2013 р. – Київ, 2013. – С. 27.52-27.56.
64. Ллойд Дж. Системы тепловидения : пер. с англ. / Дж. Ллойд. – М.: Мир, 1978. – 416 с.
65. Лялько В.И. Целостная технология получения изображений повышенного пространственного разрешения от перспективного спутникового инфракрасного спектрорадиометра / В.И. Лялько, Н.И. Лихолит, М.А. Попов, С.А. Станкевич, В.М. Тягур, К.В. Добровольская // Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 22-27 серпня 2016 р. – Київ, 2016. – С. 225.
66. Лялько В.И. Физическая модель инфракрасного спектрорадиометра с повышением пространственного разрешения при помощи субпиксельной обработки изображений / В.И. Лялько, М.А. Попов, С.А. Станкевич, С.В. Шкляр, В.Н. Подорван, Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Добровольская // Наука та інновації. – 2015. – 11(6). – с. 16-28. <http://dx.doi.org/10.15407/scin11.06.016>, ISSN 1815-2066.
67. Лялько В.І. Фізична модель інфрачервоного спектро радіометра із субпиксельним підвищенням просторової розрізненості / В.І. Лялько, М.О. Попов, С.А. Станкевич, С.В. Шкляр, В.Н. Подорван, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур, К.В. Добровольська // Українська науково-технічна конференція «Авіакосмічне приладобудування» : тези доповідей, 10-11 грудня 2014 р. – Київ, 2014. – С. 33-35.
68. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов : учеб. пособие для приборостроительных вузов / М.М. Мирошников. –Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.

69. Монич Ю.И. Оценки качества для анализа цифровых изображений / Ю.И. Монич, В.В. Старовойтов // Искусственный интеллект. – 2008. – №4. – С. 376 – 386.
70. Пат. 109181 Україна МКВ G01C 3/08. Спосіб підвищення просторової розрізненості при дистанційній зйомці з використанням субпіксельної реєстрації зображень та пристрій для його здійснення / Лихоліт М.И., Лялько В.І., Попов М.О., Станкевич С.А., Тягур В.М., Харитоненко К.В. – Опубл. в Б.І., 2015, №14. – 15 с.
71. Петров С.Б. Тенденции развития спектральной аэрокосмической аппаратуры для исследования и оперативного контроля окружающей среды / С.Б. Петров, А.П. Смирнов // Оптический журнал. – 2000. – том №67. – №5.
72. Попов М.А. Повышение пространственного разрешения путём субпиксельной обработки изображений / М.А. Попов, С.А. Станкевич, В.М. Тягур, С.В. Шкляр, В.Н. Подорван, Е.В. Добровольская, Н.С. Лубский // Матеріали 8-ої міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми телекомунікацій-2014” (ПТ-2014). – Київ: ІТС НТУУ “КПІ”, 2014.– С.57-60.
73. Программный комплекс ENVI : учебное пособие. – М.: Совзонд, 2007. – 268 с.
74. Станкевич С.А. К оценке линейного разрешения цифровых аэрокосмических снимков / С.А. Станкевич // Космічна наука і технологія. – 2002. – Т.8. – № 2/3. – С.103-106.
75. Тарасов М. М. Инфракрасные системы «смотрящего» типа / М.М. Тарасов, Ю.Г. Якушенков. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
76. Технологія підвищення просторової розрізненості зображень, що отримуються матричною знімальною камерою космічної системи “Січ”, за допомогою субпіксельного оброблення : звіт про науково-технічний проект за договором № 10 відповідно до розпорядження Президії НАН

- України від 27.02.2013 № 133. – Київ: ЦАКДЗ ІГН НАН України, 2013. – 200 с.
77. Тягур В.М. Разрешающая способность оптических систем космических многоспектральных сканеров дистанционного зондирования Земли : дис. кандидата техн. наук : 01.03.08 / Тягур Владимир Михайлович. – К., 2008. – 206 с.
 78. Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра з підвищенням просторової розрізненості за допомогою субпіксельного оброблення зображень : звіт про науково-технічний проект за договором № 13 відповідно до розпорядження Президії НАН України від 05.03.2014 №142. – Київ: ЦАКДЗ ІГН НАН України, 2014. – 297 с.
 79. Харитоненко Е.В. Методы повышения пространственного разрешения тепловизионных камер с микроболометрическими приемниками излучения для дистанционного зондирования Земли / Е.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов // Материалы 6-ой Международной студенческой научно-технической конференции «Новые направления развития приборостроения». – Минск: БНТУ, 2013. – С. 212.
 80. Харитоненко К.В. Субпіксельна обробка інфрачервоних космічних зображень з метою підвищення їх роздільної здатності / К.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека в цивільному захисті». – Київ, 2014.
 81. Харитоненко К.В. Цифрова обробка зображень з метою оцінювання швидкості руху об'єкта в тепловізійних приладах з матричними приймачами випромінювання / К.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов // IV науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» : збірник тез доповідей, 12 квітня 2011 р. – Київ: ПБФ НТУУ «КПІ». – 2011. – С. 84.

82. Харитоненко К.В. Цифрова обробка тепловізійного зображення з метою виявлення точкового об'єкта / К.В. Харитоненко // III науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» : збірник тез доповідей, 27 – 29 квітня 2010 р., м. Київ. – Київ, 2010. – С. 92.
83. Харитоненко К.В. Цифрова обробка тепловізійного зображення при дистанційному моніторингу землі / К.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов // XII Міжнародна науково-практична конференція «Людина і космос» : збірник тез, 7 - 9 квітня 2010 р. – Дніпропетровськ, 2010. – С. 525.
84. Шилин Б.В. Основные достижения в развитии тепловой аэросъемки / Б.В. Шилин // Оптический журнал. – 2003. - том 70. - №10.
85. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений / Л.П. Ярославский – М. : Сов. Радио, 1999 – 278 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1

Вимоги до основних параметрів МБК, обумовлені областями застосування

Область застосування	NETD (K)	T_{min} (K)	T_{max} (K)	Точність визначення температури (K)	Роздільна здатність на поверхні Землі (м)
Використання землі	0,3 – 0,5	265	340	1	60 - 90
Геологічне картографування	0,3	275	375	2	15
Використання земель в містах	0,5	273	320	1	100
Моніторинг потоків енергії та води	0,2	273	310	0,5	2 - 120
Вивчення клімату	0,5	243	310	2	60 - 500
Вивчення теплових куполів над містами	0,3	275	325	2	5 - 30
Агрокультура / зрошувальні системи	0,1	273	313	0,5	20 - 120
Температура поверхні морів	0,1	273	320	0,1	300 - 1000
Моніторинг вулканів	1	275	1100	2	15
Транспортування ресурсів за допомогою водних систем	0,3	273	305	0,2 - 1	60 - 100
Моніторинг узбережжя	0,1	273	320	0,1	100
Моніторинг пожеж	1	400	1000	2	100 - 1000

Таблиця А.2

Порівняльні характеристики МБК, що використовуються на КА ДЗЗ.

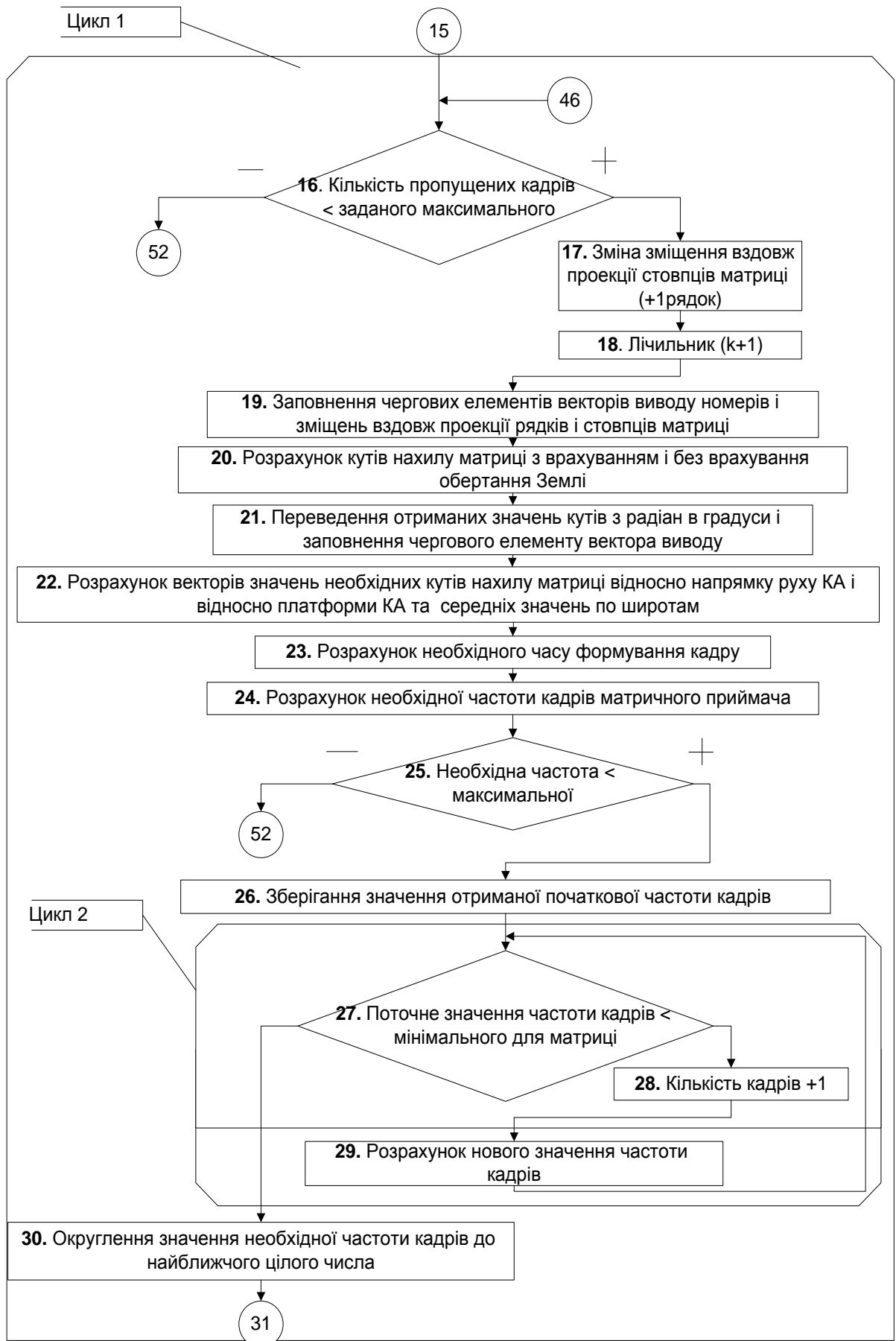
№ п/п	Проект або космічний апарат; назва камери, висота орбіти	Спектральний діапазон,	Маса камери	Енерго- споживання камери	Формат МПВ та розмір пікселя	Роздільна здатність на місцевості та смуга захвату	Застосування даних МБК	Температурна чутливість ПВ та інші дані
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	STS-85; Камера ISIR; 250 км.	8.2 – 9.0 мкм; 10.3 – 11.3 мкм; 11.5 – 12.5 мкм; 8 – 12.5 мкм	13 кг	20 Вт	327 x 240, 25 мкм	240 м; 85 км	Демонстрація, визначення параметрів хмарності	ЕШРТ приймача 0.1..0.6 К (300 К) ;
2.	ALOS-2; Камера CIRC	8 – 12 мкм	< 3 кг	< 20 Вт	640 x 480, 25 мкм	200 м; 600 км	Виявлення пожеж, вивержень вулканів, теплових аномалій в містах.	ЕШРТ приймача 0.2 К (300 К) ; Розмір камери 10 x 18 x 20 см.
3.	ISS; Камера CIRC.	8 – 12 мкм	< 3 кг	< 20 Вт	640 x 480, 25 мкм	200 м 600 км	Виявлення пожеж, вивержень вулканів, теплових аномалій в містах.	ЕШРТ приймача 0.2 К (300 К) ; Розмір камери: 10 x 18 x 20 см.
4.	CALIPSO; Сканер: IIR 705 км	8.7 мкм; 10.5 мкм; 12,0 мкм	24 кг	27 Вт	64 x 64	1000 м 64 x 64 км	Спостереження аерозолів в земній атмосфері, вивчення перистих хмар.	ЕШРТ приймача 0.3 К..0.5 К (210 К) ;

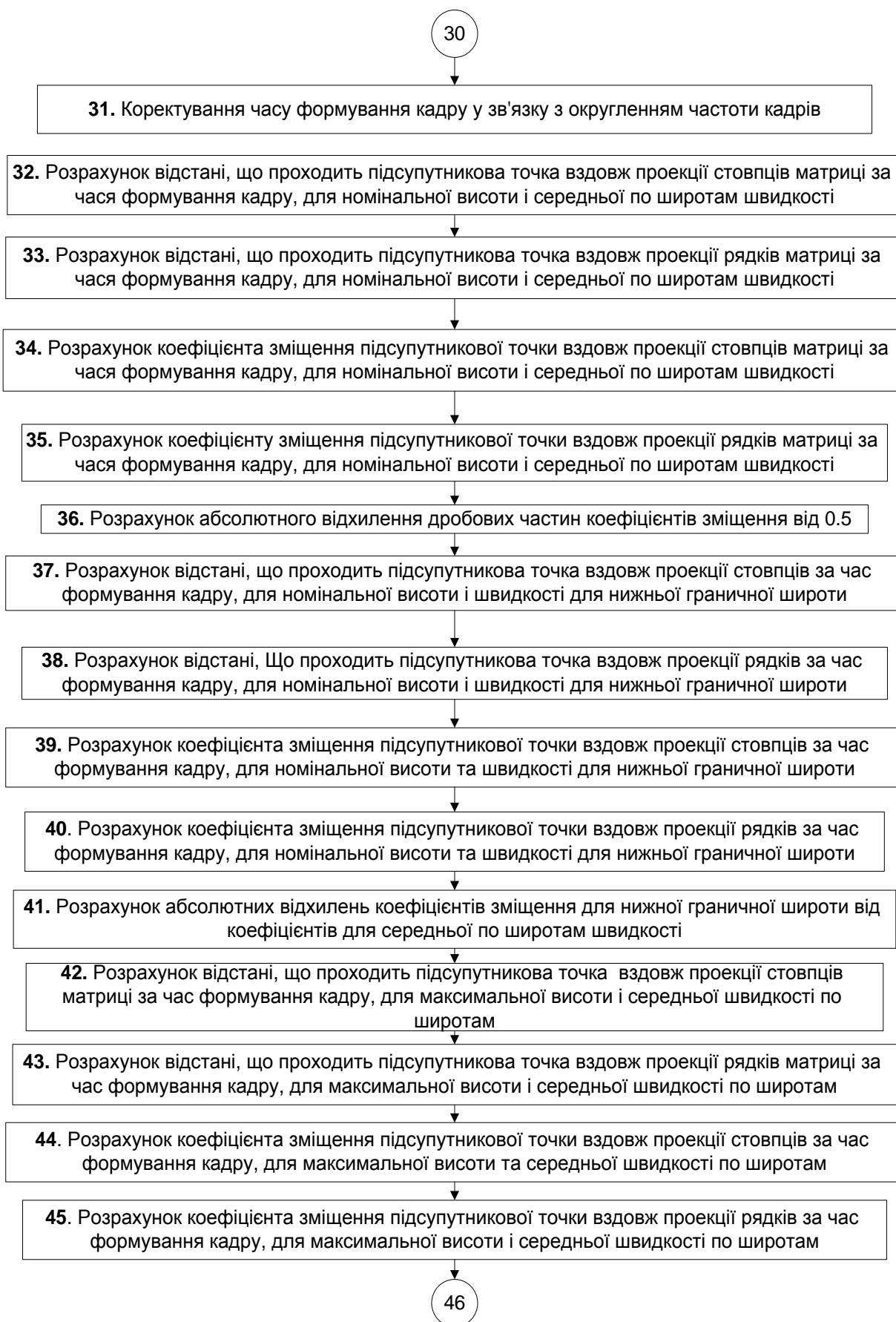
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5.	EarthCARE; Камера MSI	8.3 – 9.4 мкм; 10.4 – 11.3 мкм; 11.4 – 12.3 мкм	30 кг	55 Вт	--	500 м; 150 км	Визначення типу хмар, їх текстури, температури та інших параметрів.	ЕШРТ приймача 0.25 К (293К)
6.	SAC-D/Aquarius; Камера NIRST 657 км	3.4 – 4.2 мкм; 10.4 – 11.3 мкм; 11.4 – 12.3 мкм	5 кг	20 Вт	512 x 2; 39 мкм	351 м; 182 км	Вимірювання температури морської поверхні, ідентифікація причин появи гарячих ділянок.	ЕШРТ приймача 0.8 К (300К) ; Розміри камери: 35 x 40 x 50 см.
7.	Spot 5; Камера MUST 822км	10.3 – 11.3 мкм; 11.2 – 12.2 мкм	60 кг	100 Вт	1536 x 2; 35 мкм	250 м; 1420 км	Контроль земних ресурсів, виробництво знімків.	ЕШРТ приймача 0.43 К (300 К)
8.	Група супутників FUEGO2;	8 – 12 мкм	4.1 кг	22 Вт	2 x 240, 320 x 240, 45 мкм	369 м; 117 км	Виявлення і локалізація лісових пожеж.	ЕШРТ приймача 0.33 К (300 К)

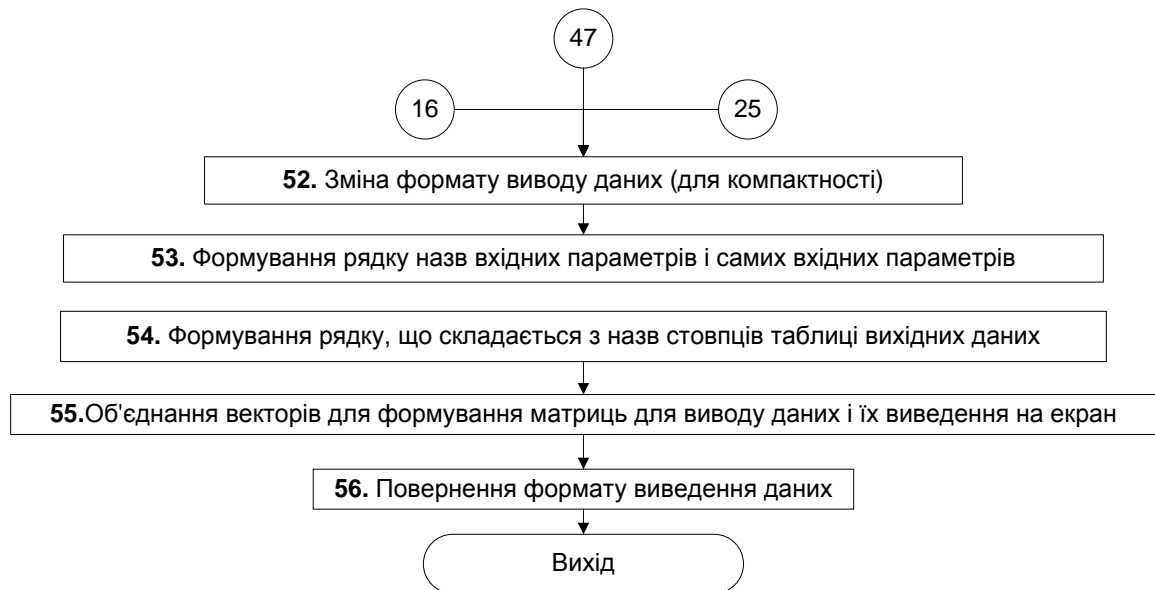
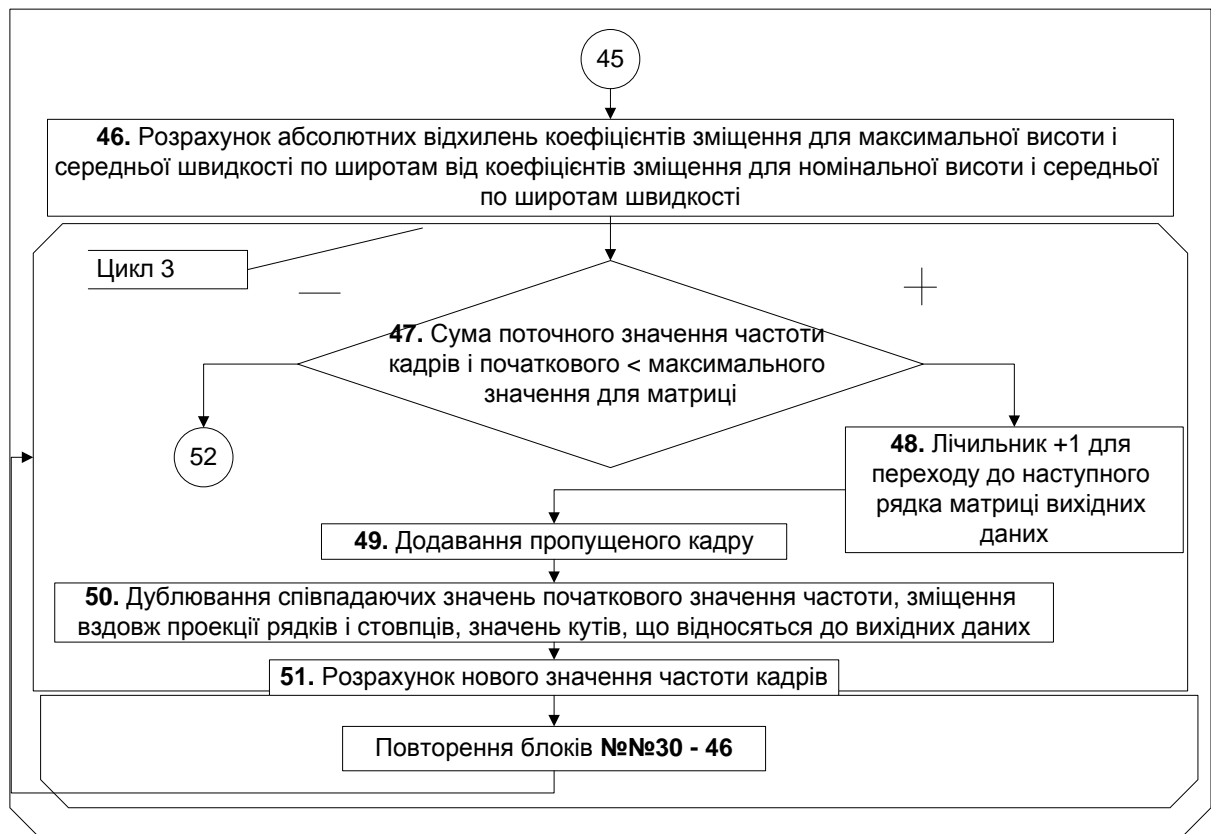
ДОДАТОК Б

Алгоритм програми розрахунку параметрів для забезпечення режиму субпіксельної реєстрації









ДОДАТОК В

Текст програми розрахунку параметрів режиму субпиксельної реєстрації зображень мікроболометричної камери для супутника

```

%скрипт в.9d СДИК с разворотом матрицы ВПРАВО для НИСХОДЯЩЕГО
участка орбиты без учета наклона платформы КА для обеспечения
режима субпиксельной регистрации (наклон орбиты по часовой
стрелке относительно оси вращения Земли), организован диалог с
пользователем
%MICROSCAN_DIALOG_v9d рассчитывает возможные комбинации углов
поворота матрицы,
%необходимой частоты кадров матрицы с учетом ее возможностей,
%для обеспечения смещения кадра на половину проекции пикселя
%по двум осям; для каждой комбинации рассчитываются погрешности
связанные
%с отклонением высоты полета от номинального значения и
изменением широты
%местности, съемка которой проводится.
%НЕ УЧИТЫВАЕТСЯ ПОВОРОТ ПЛАТФОРМЫ КА из-за СВРЗ
%ДОБАВЛЕНО к в.9:
%организован интерактивный ввод некоторых исходных данных;
%углы поворота платформы равны 0.
%Нумерация согласно алгоритму v.8

%Dобровольская Е.В., июнь 2014г., КП СПС "Арсенал"
clear %№1 удаление всех переменных, присутствующих
в рабочем пространстве
Hnom=input('Введите высоту орбиты Hnom, км
');
Apix_mkm=input('Введите размер пикселя Apix,мкм
');
f_nom=input('Введите номинальную частоту кадров f_nom,Гц
');
disp('Для расчета диапазона частот кадров от f_nom-delta_f до
f_nom+delta_f')
delta_f=input('введите значение отклонения delta_f,Гц
');
Iorbit_deg=98; %№2 угол наклона орбиты спутника, градусы
Focus=112.8; %№2 фокусное расстояние объектива, мм
Apix=Apix_mkm/1000;
%Apix=0.017; %№3 размер пикселя приемной матрицы, мм
%№2 высота орбиты спутника от поверхности
Земли, номинальное
%Hnom=668; %значение, км
%№3 максимальное количество неиспользуемых
кадров между двумя
%кадрами в одном спектральном диапазоне,
необходимыми

```



```

NmaxFrame=7;           %для осуществления микросканирования
                        %№2 максимальное возможное отклонение высоты
орбиты от
deltaH=20;             %поверхности Земли от номинального значения,
км
                        %№2 вектор широт снимаемой местности, градусы
B0_60_deg=[0;20;40;60];
f_min=f_nom-delta_f;
                        %№3 минимальное значение частоты кадров,
обеспечиваемое матрицей
f_max=f_nom+delta_f;
                        %№3 максимальное значение частоты кадров,
обеспечиваемое матрицей
                        %№4 создание векторов-столбцов для
резервирования памяти и
                        %сокращения времени работы скрипта, ввод
переменной,
z=9;                   %определяющей размер матриц выходных данных
                        %№4 вектор значений возможных углов поворота
матрицы,
                        %с учетом и без учета вращения Земли, град
det_angle=zeros(z,1);
det_angle1=zeros(z,1);
nk=ones(z,1);          %№4 вектор значений количества пропускаемых
кадров
m=ones(z,1);           %№4 вектор значений счетчика (для
соответствия результатов)
                        %№4 вектор смещений вдоль проекции столбцов
матрицы
r_col_out=zeros(z,1);
                        %№4 вектор значений частоты кадров, целые
значения, Гц
fk_Hnom_VperMidB=zeros (z,1);
                        %№4 вектора значений абсолютного отклонения
от необходимого
                        %смещения (кратное 0.5), причиной которого
является
                        %преобразование частоты кадров в целое
значение
AbsDev_col_from0_5=zeros(z,1);
AbsDev_raw_from0_5=zeros(z,1);
r_raw_Hnom=zeros(z,1);
                        %№4 вектора значений абсолютного отклонения
смещения для
                        %граничной широты от смещения для средней
широты
                        %(по граничным)
AbsDev_col_Blim=zeros (z,1);
AbsDev_raw_Blim=zeros (z,1);
                        %№4 вектора значений абсолютного отклонения
смещения для

```

```

%верхней высоты от смещения для номинальной
высоты
AbsDev_col_H=zeros (z,1);
AbsDev_raw_H=zeros (z,1);
%№4 вектор значений первоначально
рассчитанной частоты
%кадров
fnom_Hnom_VperMidB=zeros (z,1);
%№4 вектор значений средних (оптимальных)
углов установки
%приемной матрицы относительно платформы
ArrAngMid=zeros (z,1);
%№4 вектор значений средних (оптимальных)
углов наклона
%приемной матрицы относительно направления
ДВИЖЕНИЯ КА!
Angle=zeros(z,1);
Wearth= 0.00007272; %№2 угловая скорость вращения Земли, рад
Rearth=6371; %№2 радиус Земли, км
MoGra=398602; %№2 гравитационный параметр Земли, км^3/с^2
%№5 перевод некоторых входных данных в
радианы:
Iorbit=degtorad(Iorbit_deg);
B0_60_rad=degtorad(B0_60_deg);
%№5 вектор углов наклона платформы КА для
широт снимаемой
%местности, равных 0,20,40,60 градусов
соответственно,
%градусы
PlAng0_60_rad=zeros(4,1);
%PlAng0_60_rad=atan(Wearth.*sqrt((sin(Iorbit)).^2-
(sin(B0_60_rad)).^2))./(sqrt(MoGra)./( (Rearth+Hnom).^1.5)-
Wearth.*cos(Iorbit)));
PlAng0_60_deg=radtodeg(PlAng0_60_rad);
%№6 среднее арифметическое значение угла
поворота платформы
%КА относительно направления движения по 4-м
значениям
PlAngMid_rad=(PlAng0_60_rad(1)+PlAng0_60_rad(2)+PlAng0_60_rad(3)
+PlAng0_60_rad(4))/4;
%№7 расчет проекции пикселя на Земле для
номинального
%значения высоты орбиты, м
Pearth_Hnom=(Apix*Hnom*1000)/Focus;
%№8 скорость подспутниковой точки в
направлении полета КА
%для номинальной высоты полета, км/с
Vpar_Hnom=(Rearth*sqrt(MoGra))/( (Rearth+Hnom)^1.5)-
Rearth*Wearth*cos(Iorbit);
%№9 вектор значений скоростей подспутниковой
точки в

```

```

%направлении, перпендикулярном полету КА для
широт
%снимаемой местности, км/с
Vper_B= Rearth.*Wearth.*sqrt((sin(Iorbit)).^2-
(sin(B0_60_rad)).^2);
%№10 среднее арифметическое скорости
подспутниковой точки
%в направлении, перпендикулярном полету КА,
км/с
%Vper_midB=(Vper_B(1)+Vper_B(4))/2;
Vper_midB=(Vper_B(1)+Vper_B(2)+Vper_B(3)+Vper_B(4))/4;
Hmin=Hnom-deltaH; %№11 расчет минимального и максимального
ВОЗМОЖНОГО
Hmax=Hnom+deltaH; %значения высоты полета, км
%№12 расчет проекции пикселя на Земле для
максимальной и
%минимальной высоты полета, м
Pearth_Hmin=(Apix*Hmin*1000)/Focus;
Pearth_Hmax=(Apix*Hmax*1000)/Focus;
%№13 скорость подспутниковой точки в
направлении полета КА
%для максимальной и минимальной высоты
полета, км/с
Vpar_Hmin=(Rearth*sqrt(MoGra))/((Rearth+Hmin)^1.5)-
Rearth*Wearth*cos(Iorbit);
Vpar_Hmax=(Rearth*sqrt(MoGra))/((Rearth+Hmax)^1.5)-
Rearth*Wearth*cos(Iorbit);
%№14 запуск счетчика, переменная определяет
соответствие
k=1; %оптимизиркемых параметров друг другу
%№15 задание начальных значений
r_col=-0.5; %№15 задание начального смещения вдоль
проекции столбцов матрицы, 0.5 строки
r_raw=0.5; %№15 задание смещения вдоль проекции строк
матрицы, 0.5 строки
%№16 основной цикл программы
while nk(k)-1<NmaxFrame
r_col=r_col+1; %№17 изменение смещения вдоль проекции
столбцов матрицы, +1 строка
k=k+1; %№18 счетчик
m(k)=k; %№19 заполнение вектора номеров для
упорядочивания вывода данных
r_col_out(k)=r_col;
%№20,21 расчет угла наклона матрицы, без
учета доворота для
%компенсации вращения Земли, рад, градусы
det_angle1_rad=atan(r_raw/r_col);
det_angle1(k)=radtodeg(det_angle1_rad);
%№20,21 расчет угла наклона матрицы, с учетом
доворота для
%компенсации вращения Земли, рад, градусы

```

```

det_angle_rad=atan((r_raw*Vpar_Hnom+r_col*Vper_midB)/(r_col*Vpar
_Hnom-r_raw*Vper_midB));
    det_angle(k)=radtodeg(det_angle_rad);
                                %№22 вектор значений необходимых углов
наклона матрицы
                                %относительно направления ДВИЖЕНИЯ КА для
разных широт
                                %снимаемой местности, рад

GenAng0_60_rad=atan((r_raw.*Vpar_Hnom+r_col.*Vper_B)./(r_col.*Vp
ar_Hnom-r_raw.*Vper_B));
                                %№22 вектор значений необходимых углов
наклона матрицы
                                %относительно платформы с учетом ее поворота
для разных
                                %широт снимаемой местности, рад
    ArrAng0_60_rad=GenAng0_60_rad-PlAng0_60_rad;
                                %№22 среднее арифметическое значение углов
наклона матрицы
                                %относительно платформы с учетом ее
поворота, рад,
                                %градусы

ArrAngMid0_60_rad=(ArrAng0_60_rad(1)+ArrAng0_60_rad(2)+ArrAng0_6
0_rad(3)+ArrAng0_60_rad(4))/4;
    ArrAngMid(k)=radtodeg(ArrAngMid0_60_rad);
                                %№22 среднее (оптимальное, расчетное)
значение угла наклона матрицы
                                %относительно направления ДВИЖЕНИЯ КА,
рад, градусы
    Angle_rad=ArrAngMid0_60_rad+PlAngMid_rad;
    Angle(k)=radtodeg(Angle_rad);
                                %№23 расчет времени формирования кадра,
оптимального для
                                %обеспечения субпиксельной регистрации, с

t_Hnom_VperMidB=(r_col*Pearth_Hnom)/(1000*Vpar_Hnom*cos(Angle_ra
d)+...
    1000*Vper_midB*sin(Angle_rad));
                                %№24 расчет необходимой частоты кадров, Гц
    f_Hnom_VperMidB =1/t_Hnom_VperMidB;
                                %№25 проверка необходимой частоты кадров на
превышение
                                %максимального значения для матрицы
    if f_Hnom_VperMidB<=f_max
                                %№26 сохранение значения первоначальной
частоты, Гц
        fnom_Hnom_VperMidB(k)=f_Hnom_VperMidB;
        nk(k)=1;
                                %№27,28,29 проверка возможности обеспечения
необходимой частоты

```

```

%кадров матрицей, подъем частоты кадров до
минимального
%значения
while f_Hnom_VperMidB<=f_min
    nk(k)=nk(k)+1;
    f_Hnom_VperMidB=(nk(k))*fnom_Hnom_VperMidB(k);
end %конец расчета режима пропуска кадров
%№30 округление значения необходимой частоты
кадров до
%ближайшего целого числа, Гц
fk_Hnom_VperMidB(k)=round(f_Hnom_VperMidB);
%№31 корректировка времени формирования
кадра, с
t_Hnom_VperMidB=nk(k)/fk_Hnom_VperMidB(k);
%№32 расчет расстояния,проходимого
подспутниковой точкой
%вдоль проекции столбцов матрицы за время
формирования
%кадра, для номинальной высоты и средней
скорости по
%широтам, м

Scol_Hnom_VperMidB=1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad)
+...
+1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad);
%№33 расчет расстояния,проходимого
подспутниковой точкой
%вдоль проекции строк матрицы за время
формирования
%кадра, для номинальной высоты и средней
скорости по
%широтам, м
Sraw_Hnom_VperMidB=-(-
1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad)+...
+1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad));
%№34 расчет коэффициента смещения
подспутниковой точки вдоль
%проекции столбцов матрицы за время
формирования кадра
%для номинальной высоты и средней скорости
по широтам
r_col_Hnom_VperMidB=Scol_Hnom_VperMidB/Pearth_Hnom;
%№35 расчет коэффициента смещения
подспутниковой точки вдоль
%проекции строк матрицы за время
формирования кадра для
%номинальной высоты и средней скорости по
широтам
r_raw_Hnom_VperMidB=Sraw_Hnom_VperMidB/Pearth_Hnom;
%№36 расчет абсолютного отклонения дробной
части
%коэффициентов смещения от 0.5

```

```

AbsDev_col_from0_5(k)=r_col_Hnom_VperMidB-r_col_out(k);
%r_raw_Hnom(k)=r_raw_Hnom_VperMidB;
AbsDev_raw_from0_5(k)=r_raw_Hnom_VperMidB-0.5;
%№37 расчет расстояния,проходимого
подспутниковой точкой
%вдоль проекции столбцов матрицы за время
формирования
%кадра, для номинальной высоты и скорости по
нижней
%граничной широте, м

Scol_Hnom_Blim1=1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad)+..
.
+1000*Vper_B(1)*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad);
%№38 расчет расстояния,проходимого
подспутниковой точкой
%вдоль проекции строк матрицы за время
формирования
%кадра, для номинальной высоты и скорости по
нижней
%граничной широте, м
Sraw_Hnom_Blim1=-(-
1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad)+...
+1000*Vper_B(1)*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad));
%№39 расчет коэффициента смещения
подспутниковой точки вдоль
%проекции столбцов матрицы за время
формирования кадра
%для номинальной высоты и скорости по
нижней
%граничной широте, м
r_col_Hnom_Blim1=Scol_Hnom_Blim1/Pearth_Hnom;
%№40 расчет коэффициента смещения
подспутниковой точки вдоль
%проекции строк матрицы за время
формирования кадра
%для номинальной высоты и скорости по
нижней
%граничной широте, м
r_raw_Hnom_Blim1=Sraw_Hnom_Blim1/Pearth_Hnom;
%№41 расчет абсолютных отклонений
коэффициентов смещения
%для нижней граничной широты от
коэффициентов для
%средней по широтам скорости
AbsDev_col_Blim(k)=r_col_Hnom_Blim1-r_col_Hnom_VperMidB;
AbsDev_raw_Blim(k)=r_raw_Hnom_Blim1-r_raw_Hnom_VperMidB;
%№42 расчет расстояния,проходимого
подспутниковой точкой
%вдоль проекции столбцов матрицы за время
формирования
%кадра, для максимальной высоты и средней

```

```

%скорости по широтам, м

Scol_Hmax_VperMidB=1000*Vpar_Hmax*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad)
+...
    +1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad);
    %№43 расчет расстояния,проходимого
подспутниковой точкой
    %вдоль проекции строк матрицы за время
формирования
    %кадра, для максимальной высоты и средней
    %скорости по широтам, м
    Sraw_Hmax_VperMidB=-(-
1000*Vpar_Hmax*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad)+...
    +1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad));
    %№44 расчет коэффициента смещения
подспутниковой точки вдоль
    %проекции столбцов матрицы за время
формирования кадра
    %для максимальной высоты и средней скорости
по широтам
    r_col_Hmax_VperMidB=Scol_Hmax_VperMidB/Pearth_Hmax;
    %№45 расчет коэффициента смещения
подспутниковой точки вдоль
    %проекции строк матрицы за время
формирования кадра для
    %максимальной высоты и средней скорости по
широтам
    r_raw_Hmax_VperMidB=Sraw_Hmax_VperMidB/Pearth_Hmax;
    %№46 расчет абсолютных отклонений
коэффициентов смещения
    %для максимальной высоты и средней скорости
по широтам
    %от коэффициентов смещения для номинальной
высоты и средней
    %скорости по широтам
    AbsDev_col_H(k)=r_col_Hmax_VperMidB-r_col_Hnom_VperMidB;
    AbsDev_raw_H(k)=r_raw_Hmax_VperMidB-r_raw_Hnom_VperMidB;
    %elseif k=k-1;
    %№47 условие цикла подбора нескольких частот
работы
    %матрицы
    while f_Hnom_VperMidB+fnom_Hnom_VperMidB(k)<=f_max
    %№48 счетчик - для заполнения следующей
"строки" выходных
    %данных
        k=k+1;
        m(k)=k;
        %№49 добавление пропускаемого кадра
        nk(k)=nk(k-1)+1;
        %№50 дублирование предыдущих значений
        fnom_Hnom_VperMidB(k)=fnom_Hnom_VperMidB(k-1);

```

```

                                %№51 расчет нового возможного значения
частоты кадров
    f_Hnom_VperMidB=(nk(k))*fnom_Hnom_VperMidB(k);
                                %№50
    r_col_out(k)=r_col_out(k-1);
    det_angle1(k)=det_angle1(k-1);
    det_angle(k)=det_angle(k-1);
    ArrAngMid(k)=ArrAngMid(k-1);
    Angle(k)=Angle(k-1);
                                % (№30)
    fk_Hnom_VperMidB(k)=round(f_Hnom_VperMidB);
                                % (№31)
    t_Hnom_VperMidB=nk(k)/fk_Hnom_VperMidB(k);
                                % (№32)

Scol_Hnom_VperMidB=1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad)
+...
    +1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad);
                                % (№33)
    Sraw_Hnom_VperMidB=-(-
1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad)+...
    +1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad));
                                % (№34)
    r_col_Hnom_VperMidB=Scol_Hnom_VperMidB/Pearth_Hnom;
                                % (№35)
    r_raw_Hnom_VperMidB=Sraw_Hnom_VperMidB/Pearth_Hnom;
                                % (№36)
    %r_raw_Hnom(k)=r_raw_Hnom_VperMidB;
    AbsDev_col_from0_5(k)=r_col_Hnom_VperMidB-
r_col_out(k);
    AbsDev_raw_from0_5(k)=r_raw_Hnom_VperMidB-0.5;
                                % (№37)

Scol_Hnom_Blim1=1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad)+..
.
    +1000*Vper_B(1)*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad);
                                % (№38)
    Sraw_Hnom_Blim1=-(-
1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad)+...
    +1000*Vper_B(1)*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad));
                                % (№39)
    r_col_Hnom_Blim1=Scol_Hnom_Blim1/Pearth_Hnom;
                                % (№40)
    r_raw_Hnom_Blim1=Sraw_Hnom_Blim1/Pearth_Hnom;
                                % (№41)
    AbsDev_col_Blim(k)=r_col_Hnom_Blim1-
r_col_Hnom_VperMidB;
    AbsDev_raw_Blim(k)=r_raw_Hnom_Blim1-
r_raw_Hnom_VperMidB;
                                % (№42)

```



```

Scol_Hmax_VperMidB=1000*Vpar_Hmax*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad)
+...
    +1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad);
    % (№43)
    Sraw_Hmax_VperMidB=(-(-
1000*Vpar_Hmax*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad)+...
    +1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad)));
    % (№44)
    r_col_Hmax_VperMidB=Scol_Hmax_VperMidB/Pearth_Hmax;
    % (№45)
    r_raw_Hmax_VperMidB=Sraw_Hmax_VperMidB/Pearth_Hmax;
    % (№46)
    AbsDev_col_H(k)=r_col_Hmax_VperMidB-
r_col_Hnom_VperMidB;
    AbsDev_raw_H(k)=r_raw_Hmax_VperMidB-
r_raw_Hnom_VperMidB;
    end
    end
end
format short
%конец основного цикла программы
%№52 изменение формата вывода данных
%№53 формированит строки названий входных
параметров и
%строки самих входных параметров для вывода
u0=['ПроекцПикс,м' ' Фокус,мм' ' Апикс,мм' ' Нном,км' '
f_min,Гц' ' f_max,Гц' ' МаксШирота,гр'];
E0=[Pearth_Hnom Focus Apix Hnom f_min f_max B0_60_deg(4)];
%№54 формированит строки для "шапки" таблицы
вывода
u=[' №' ' Угол0,гр ' ' УголВращ,гр ' 'УголУстМатр '
'УголДвиж' ' КоэфСмещ' ' ПропускКадры'];
%№55 объединение векторов для формирования
матриц вывода
%данных и их вывод на экран
E=[m det_angle1 det_angle ArrAngMid Angle r_col_out nk-1];
u1=[' №' ' f,Гц ' ' aD0.5col' ' aD0.5raw
' ' aDB_col ' ' aDB_raw '];
E1=[m fnom_Hnom_VperMidB fk_Hnom_VperMidB AbsDev_col_from0_5
AbsDev_raw_from0_5 AbsDev_col_Blim AbsDev_raw_Blim];
u2=[' №' ' aDH_col ' ' aDH_raw'];
E2=[m AbsDev_col_H AbsDev_raw_H];
disp(' Параметры для обеспечения субпиксельной
регистрации');
disp(' (в.9,с учетом поворота платформы
КА) ');
disp(' нисходящий участок орбиты, поворот приемника по
часовой стрелке');
disp(' относительно направления движения
КА');
disp(u0);
disp(E0);
disp(u);

```

```

disp(E);
disp(u1);
disp(E1);
disp(u2);
disp(E2);
u3=[ '    Широта, гр ' '    УголПлатф, гр'];
E3=[B0_60_deg PlAng0_60_deg];
disp(u3);
disp(E3);
format long          %№56 возвращение формата вывода данных

```

```

%скрипт в.10 СДИК с разворотом матрицы ВЛЕВО для НИСХОДЯЩЕГО
участка орбиты без учета наклона платформы КА для обеспечения
режима субпиксельной регистрации (наклон орбиты по часовой
стрелке относительно оси вращения Земли), организован диалог с
пользователем
%MICROSCAN_DIALOG_v9d рассчитывает возможные комбинации углов
поворота матрицы,
%необходимой частоты кадров матрицы с учетом ее возможностей,
%для обеспечения смещения кадра на половину проекции пикселя
%по двум осям; для каждой комбинации рассчитываются погрешности
связанные
%с отклонением высоты полета от номинального значения и
изменением широты
%местности, съемка которой проводится.
%НЕ УЧИТЫВАЕТСЯ ПОВОРОТ ПЛАТФОРМЫ КА из-за СВРЗ
%ДОБАВЛЕНО к в.10:
%организован интерактивный ввод некоторых исходных данных;
%углы поворота платформы равны 0.
%Нумерация согласно алгоритму v.8

%Dобровольская Е.В., июнь 2014г., КП СПС "Арсенал"
clear          %№1 удаление всех переменных, присутствующих
в рабочем пространстве
Hnom=input('Введите высоту орбиты Hnom, км
');
Apix_mkm=input('Введите размер пикселя Apix,мкм
');
f_nom=input('Введите номинальную частоту кадров f_nom,Гц
');
disp('Для расчета диапазона частот кадров от f_nom-delta_f до
f_nom+delta_f')
delta_f=input('введите значение отклонения delta_f,Гц
');
Iorbit_deg=98;      %№2 угол наклона орбиты спутника, градусы
Focus=112.8;        %№2 фокусное расстояние объектива, мм
Apix=Apix_mkm/1000;
%Apix=0.025;        %№3 размер пикселя приемной матрицы, мм
                    %№2 высота орбиты спутника от поверхности
Земли, номинальное

```

```

%Nnom=668;           %значение, км
                     %№3 максимальное количество неиспользуемых
кадров между двумя
                     %кадрами в одном спектральном диапазоне,
необходимыми
NmaxFrame=7;         %для осуществления микросканирования
                     %№2 максимальное возможное отклонение высоты
орбиты от
deltaH=20;           %поверхности Земли от номинального значения,
км
                     %№2 вектор широт снимаемой местности, градусы
B0_60_deg=[0;20;40;60];
f_min=f_nom-delta_f;
f_max=f_nom+delta_f;
%f_min=30-3;         %№3 минимальное значение частоты кадров,
обеспечиваемое матрицей
%f_max=60+3;         %№3 максимальное значение частоты кадров,
обеспечиваемое матрицей
                     %№4 создание векторов-столбцов для
резервирования памяти и
                     %сокращения времени работы скрипта, ввод
переменной,
z=9;                 %определяющей размер матриц выходных данных
                     %№4 вектор значений возможных углов поворота
матрицы,
                     %с учетом и без учета вращения Земли, град
det_angle=zeros(z,1);
det_angle1=zeros(z,1);
nk=ones(z,1);        %№4 вектор значений количества пропускаемых
кадров
m=ones(z,1);         %№4 вектор значений счетчика (для
соответствия результатов)
                     %№4 вектор смещений вдоль проекции столбцов
матрицы
r_col_out=zeros(z,1);
                     %№4 вектор значений частоты кадров, целые
значения, Гц
fk_Nnom_VperMidB=zeros (z,1);
                     %№4 вектора значений абсолютного отклонения
от необходимого
                     %смещения (кратное 0.5), причиной которого
является
                     %преобразование частоты кадров в целое
значение
AbsDev_col_from0_5=zeros(z,1);
AbsDev_raw_from0_5=zeros(z,1);
r_raw_Nnom=zeros(z,1);
                     %№4 вектора значений абсолютного отклонения
смещения для
                     %граничной широты от смещения для средней
широты
                     % (по граничным)

```

```

AbsDev_col_Blim=zeros (z,1);
AbsDev_raw_Blim=zeros (z,1);
        %№4 вектора значений абсолютного отклонения
смещения для
        %верхней высоты от смещения для номинальной
высоты
AbsDev_col_H=zeros (z,1);
AbsDev_raw_H=zeros (z,1);
        %№4 вектор значений первоначально
рассчитанной частоты
        %кадров
fnom_Hnom_VperMidB=zeros (z,1);
        %№4 вектор значений средних (оптимальных)
углов установки
        %приемной матрицы относительно платформы
ArrAngMid=zeros (z,1);
        %№4 вектор значений средних (оптимальных)
углов наклона
        %приемной матрицы относительно направления
ДВИЖЕНИЯ КА!
Angle=zeros(z,1);
Wearth= 0.00007272; %№2 угловая скорость вращения Земли, рад
Rearth=6371; %№2 радиус Земли, км
MoGra=398602; %№2 гравитационный параметр Земли, км^3/с^2
        %№5 перевод некоторых входных данных в
радианы:
Iorbit=degtorad(Iorbit_deg);
B0_60_rad=degtorad(B0_60_deg);
        %№5 вектор углов наклона платформы КА для
широт снимаемой
        %местности, равных 0,20,40,60 градусов
соответственно,
        %градусы
PlAng0_60_rad=zeros(4,1);
%PlAng0_60_rad=atan(Wearth.*sqrt((sin(Iorbit)).^2-
(sin(B0_60_rad)).^2))./(sqrt(MoGra)./( (Rearth+Hnom).^1.5)-
Wearth.*cos(Iorbit)));
PlAng0_60_deg=radtodeg(PlAng0_60_rad);
        %№6 среднее арифметическое значение угла
поворота платформы
        %КА относительно направления движения по 4-м
значениям
PlAngMid_rad=(PlAng0_60_rad(1)+PlAng0_60_rad(2)+PlAng0_60_rad(3)
+PlAng0_60_rad(4))/4;
        %№7 расчет проекции пикселя на Земле для
номинального
        %значения высоты орбиты, м
Pearth_Hnom=(Apix*Hnom*1000)/Focus;
        %№8 скорость подспутниковой точки в
направлении полета КА
        %для номинальной высоты полета, км/с

```

```

Vpar_Hnom=(Rearth*sqrt(MoGra))/((Rearth+Hnom)^1.5)-
Rearth*Wearth*cos(Iorbit);
%№9 вектор значений скоростей подспутниковой
точки в
%направлении, перпендикулярном полету КА для
широт
%снимаемой местности, км/с
Vper_B= Rearth.*Wearth.*sqrt((sin(Iorbit)).^2-
(sin(B0_60_rad)).^2);
%№10 среднее арифметическое скорости
подспутниковой точки
%в направлении, перпендикулярном полету КА,
км/с
%Vper_midB=(Vper_B(1)+Vper_B(4))/2;
Vper_midB=(Vper_B(1)+Vper_B(2)+Vper_B(3)+Vper_B(4))/4;
Hmin=Hnom-deltaH; %№11 расчет минимального и максимального
возможного
Hmax=Hnom+deltaH; %значения высоты полета, км
%№12 расчет проекции пикселя на Земле для
максимальной и
%минимальной высоты полета, м
Pearth_Hmin=(Apix*Hmin*1000)/Focus;
Pearth_Hmax=(Apix*Hmax*1000)/Focus;
%№13 скорость подспутниковой точки в
направлении полета КА
%для максимальной и минимальной высоты
полета, км/с
Vpar_Hmin=(Rearth*sqrt(MoGra))/((Rearth+Hmin)^1.5)-
Rearth*Wearth*cos(Iorbit);
Vpar_Hmax=(Rearth*sqrt(MoGra))/((Rearth+Hmax)^1.5)-
Rearth*Wearth*cos(Iorbit);
%№14 запуск счетчика, переменная определяет
соответствие
k=1; %оптимизиркемых параметров друг другу
%№15 задание начальных значений
r_col=-0.5; %№15 задание начального смещения вдоль
проекции столбцов матрицы, 0.5 строки
r_raw=0.5; %№15 задание смещения вдоль проекции строк
матрицы, 0.5 строки
%№16 основной цикл программы
while nk(k)-1<NmaxFrame
    r_col=r_col+1; %№17 изменение смещения вдоль проекции
    столбцов матрицы, +1 строка
    k=k+1; %№18 счетчик
    m(k)=k; %№19 заполнение вектора номеров для
    упорядочивания вывода данных
    r_col_out(k)=r_col;
    %№20,21 расчет угла наклона матрицы, без
    учета доворота для
    %компенсации вращения Земли, рад, градусы
    det_angle1_rad=atan(r_raw/r_col);
    det_angle1(k)=radtodeg(det_angle1_rad);

```

```

        %№20,21 расчет угла наклона матрицы, с учетом
        доворота для
        %компенсации вращения Земли, рад, градусы
        det_angle_rad=atan((-r_raw*Vpar_Hnom+r_col*Vper_midB)/(-
        r_col*Vpar_Hnom-r_raw*Vper_midB));
        det_angle(k)=radtodeg(det_angle_rad);
        %№22 вектор значений необходимых углов
        наклона матрицы
        %относительно направления ДВИЖЕНИЯ КА для
        разных широт
        %снимаемой местности, рад
        GenAng0_60_rad=atan((-r_raw.*Vpar_Hnom+r_col.*Vper_B)./(-
        r_col.*Vpar_Hnom-r_raw.*Vper_B));
        %№22 вектор значений необходимых углов
        наклона матрицы
        %относительно платформы с учетом ее поворота
        для разных
        %широт снимаемой местности, рад
        ArrAng0_60_rad=GenAng0_60_rad+PlAng0_60_rad;
        %№22 среднее арифметическое значение углов
        наклона матрицы
        %относительно платформы с учетом ее
        поворота, рад,
        %градусы
        ArrAngMid0_60_rad=(ArrAng0_60_rad(1)+ArrAng0_60_rad(2)+ArrAng0_60_
        0_rad(3)+ArrAng0_60_rad(4))/4;
        ArrAngMid(k)=radtodeg(ArrAngMid0_60_rad);
        %№22 среднее (оптимальное, расчетное)
        значение угла наклона матрицы
        %относительно направления ДВИЖЕНИЯ КА,
        рад, градусы
        Angle_rad=ArrAngMid0_60_rad-PlAngMid_rad;
        Angle(k)=radtodeg(Angle_rad);
        %№23 расчет времени формирования кадра,
        оптимального для
        %обеспечения субпиксельной регистрации, с
        t_Hnom_VperMidB=(r_col*Pearth_Hnom)/(1000*Vpar_Hnom*cos(Angle_ra
        d)-...
        1000*Vper_midB*sin(Angle_rad));
        %№24 расчет необходимой частоты кадров, Гц
        f_Hnom_VperMidB =1/t_Hnom_VperMidB;
        %№25 проверка необходимой частоты кадров на
        превышение
        %максимального значения для матрицы
        if f_Hnom_VperMidB<=f_max
        %№26 сохранение значения первоначальной
        частоты, Гц
        fnom_Hnom_VperMidB(k)=f_Hnom_VperMidB;
        nk(k)=1;

```

```

                                %№27,28,29 проверка возможности обеспечения
необходимой частоты
                                %кадров матрицей, подъем частоты кадров до
минимального
                                %значения
while f_Hnom_VperMidB<=f_min
    nk(k)=nk(k)+1;
    f_Hnom_VperMidB=(nk(k))*fnom_Hnom_VperMidB(k);
end                                %конец расчета режима пропуска кадров
                                %№30 округление значения необходимой частоты
кадров до
                                %ближайшего целого числа, Гц
    fk_Hnom_VperMidB(k)=round(f_Hnom_VperMidB);
                                %№31 корректировка времени формирования
кадра, с
    t_Hnom_VperMidB=nk(k)/fk_Hnom_VperMidB(k);
                                %№32 расчет расстояния,проходимого
подспутниковой точкой
                                %вдоль проекции столбцов матрицы за время
формирования
                                %кадра, для номинальной высоты и средней
скорости по
                                %широтам, м

Scol_Hnom_VperMidB=1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad)
-...
    -1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad);
                                %№33 расчет расстояния,проходимого
подспутниковой точкой
                                %вдоль проекции строк матрицы за время
формирования
                                %кадра, для номинальной высоты и средней
скорости по
                                %широтам, м

Sraw_Hnom_VperMidB=1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad)
+...
    +1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad);
                                %№34 расчет коэффициента смещения
подспутниковой точки вдоль
                                %проекции столбцов матрицы за время
формирования кадра
                                %для номинальной высоты и средней скорости
по широтам
    r_col_Hnom_VperMidB=Scol_Hnom_VperMidB/Pearth_Hnom;
                                %№35 расчет коэффициента смещения
подспутниковой точки вдоль
                                %проекции строк матрицы за время
формирования кадра для
                                %номинальной высоты и средней скорости по
широтам
    r_raw_Hnom_VperMidB=Sraw_Hnom_VperMidB/Pearth_Hnom;

```

```

%№36 расчет абсолютного отклонения дробной
части
%коэффициентов смещения от 0.5
AbsDev_col_from0_5(k)=r_col_Hnom_VperMidB-r_col_out(k);
%r_raw_Hnom(k)=r_raw_Hnom_VperMidB;
AbsDev_raw_from0_5(k)=r_raw_Hnom_VperMidB-0.5;
%№37 расчет расстояния,проходимого
подспутниковой точкой
%вдоль проекции столбцов матрицы за время
формирования
%кадра, для номинальной высоты и скорости по
нижней
%граничной широте, м

Scol_Hnom_Blim1=1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad)-
...
-1000*Vper_B(1)*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad);
%№38 расчет расстояния,проходимого
подспутниковой точкой
%вдоль проекции строк матрицы за время
формирования
%кадра, для номинальной высоты и скорости по
нижней
%граничной широте, м

Sraw_Hnom_Blim1=1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad)+..
.
+1000*Vper_B(1)*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad);
%№39 расчет коэффициента смещения
подспутниковой точки вдоль
%проекции столбцов матрицы за время
формирования кадра
%для номинальной высоты и скорости по
нижней
%граничной широте, м
r_col_Hnom_Blim1=Scol_Hnom_Blim1/Pearth_Hnom;
%№40 расчет коэффициента смещения
подспутниковой точки вдоль
%проекции строк матрицы за время
формирования кадра
%для номинальной высоты и скорости по
нижней
%граничной широте, м
r_raw_Hnom_Blim1=Sraw_Hnom_Blim1/Pearth_Hnom;
%№41 расчет абсолютных отклонений
коэффициентов смещения
%для нижней граничной широты от
коэффициентов для
%средней по широтам скорости
AbsDev_col_Blim(k)=r_col_Hnom_Blim1-r_col_Hnom_VperMidB;
AbsDev_raw_Blim(k)=r_raw_Hnom_Blim1-r_raw_Hnom_VperMidB;

```



```

        %№42 расчет расстояния,проходимого
подспутниковой точкой
        %вдоль проекции столбцов матрицы за время
формирования
        %кадра, для максимальной высоты и средней
%скорости по широтам, м

Scol_Hmax_VperMidB=1000*Vpar_Hmax*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad)
-...
        -1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad);
        %№43 расчет расстояния,проходимого
подспутниковой точкой
        %вдоль проекции строк матрицы за время
формирования
        %кадра, для максимальной высоты и средней
%скорости по широтам, м

Sraw_Hmax_VperMidB=1000*Vpar_Hmax*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad)
+...
        +1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad);
        %№44 расчет коэффициента смещения
подспутниковой точки вдоль
        %проекции столбцов матрицы за время
формирования кадра
        %для максимальной высоты и средней скорости
по широтам
        r_col_Hmax_VperMidB=Scol_Hmax_VperMidB/Pearth_Hmax;
        %№45 расчет коэффициента смещения
подспутниковой точки вдоль
        %проекции строк матрицы за время
формирования кадра для
        %максимальной высоты и средней скорости по
широтам
        r_raw_Hmax_VperMidB=Sraw_Hmax_VperMidB/Pearth_Hmax;
        %№46 расчет абсолютных отклонений
коэффициентов смещения
        %для максимальной высоты и средней скорости
по широтам
        %от коэффициентов смещения для номинальной
высоты и средней
        %скорости по широтам
        AbsDev_col_H(k)=r_col_Hmax_VperMidB-r_col_Hnom_VperMidB;
        AbsDev_raw_H(k)=r_raw_Hmax_VperMidB-r_raw_Hnom_VperMidB;
        %elseif k=k-1;
        %№47 условие цикла подбора нескольких частот
работы
        %матрицы
        while f_Hnom_VperMidB+fnom_Hnom_VperMidB(k)<=f_max
        %№48 счетчик - для заполнения следующей
"строки" выходных
        %данных
        k=k+1;

```

```

m(k)=k;
%№49 добавление пропускаемого кадра
nk(k)=nk(k-1)+1;
%№50 дублирование предыдущих значений
fnom_Hnom_VperMidB(k)=fnom_Hnom_VperMidB(k-1);
%№51 расчет нового возможного значения
частоты кадров
f_Hnom_VperMidB=(nk(k))*fnom_Hnom_VperMidB(k);
%№50
r_col_out(k)=r_col_out(k-1);
det_angle1(k)=det_angle1(k-1);
det_angle(k)=det_angle(k-1);
ArrAngMid(k)=ArrAngMid(k-1);
Angle(k)=Angle(k-1);
% (№30)
fk_Hnom_VperMidB(k)=round(f_Hnom_VperMidB);
% (№31)
t_Hnom_VperMidB=nk(k)/fk_Hnom_VperMidB(k);
% (№32)

Scol_Hnom_VperMidB=1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad)
-...
-1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad);
% (№33)

Sraw_Hnom_VperMidB=1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad)
+...
+1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad);
% (№34)
r_col_Hnom_VperMidB=Scol_Hnom_VperMidB/Pearth_Hnom;
% (№35)
r_raw_Hnom_VperMidB=Sraw_Hnom_VperMidB/Pearth_Hnom;
% (№36)
%r_raw_Hnom(k)=r_raw_Hnom_VperMidB;
AbsDev_col_from0_5(k)=r_col_Hnom_VperMidB-
r_col_out(k);
AbsDev_raw_from0_5(k)=r_raw_Hnom_VperMidB-0.5;
% (№37)

Scol_Hnom_Blim1=1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad)-
...
-1000*Vper_B(1)*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad);
% (№38)

Sraw_Hnom_Blim1=1000*Vpar_Hnom*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad)+..
.
+1000*Vper_B(1)*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad);
% (№39)
r_col_Hnom_Blim1=Scol_Hnom_Blim1/Pearth_Hnom;
% (№40)
r_raw_Hnom_Blim1=Sraw_Hnom_Blim1/Pearth_Hnom;
% (№41)

```

```

        AbsDev_col_Blim(k)=r_col_Hnom_Blim1-
r_col_Hnom_VperMidB;
        AbsDev_raw_Blim(k)=r_raw_Hnom_Blim1-
r_raw_Hnom_VperMidB;
                                % (№42)

Scol_Hmax_VperMidB=1000*Vpar_Hmax*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad)
-...
                                -1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad);
                                % (№43)

Sraw_Hmax_VperMidB=1000*Vpar_Hmax*t_Hnom_VperMidB*sin(Angle_rad)
+...
                                +1000*Vper_midB*t_Hnom_VperMidB*cos(Angle_rad);
                                % (№44)
        r_col_Hmax_VperMidB=Scol_Hmax_VperMidB/Pearth_Hmax;
                                % (№45)
        r_raw_Hmax_VperMidB=Sraw_Hmax_VperMidB/Pearth_Hmax;
                                % (№46)
        AbsDev_col_H(k)=r_col_Hmax_VperMidB-
r_col_Hnom_VperMidB;
        AbsDev_raw_H(k)=r_raw_Hmax_VperMidB-
r_raw_Hnom_VperMidB;
        end
    end
end                                %конец основного цикла программы
format short                        %№52 изменение формата вывода данных
                                %№53 формированит строки названий входных
параметров и
                                %строки самих входных параметров для вывода
u0=['ПроекцПикс,м' ' Фокус,мм' ' Апикс,мм' ' Нном,км' '
f_min,Гц' ' f_max,Гц' ' МаксШирота,гр'];
E0=[Pearth_Hnom Focus Apix Hnom f_min f_max B0_60_deg(4)];
                                %№54 формированит строки для "шапки" таблицы
вывода
u=['      №' '      Угол0,гр ' ' УголВращ,гр ' 'УголУстМатр '
'УголДвиж' ' КоэфСмещ' ' ПропускКадры'];
                                %№55 объединение векторов для формирования
матриц вывода
                                %данных и их вывод на экран
E=[m det_angle1 det_angle ArrAngMid Angle r_col_out nk-1];
u1=['      №' '      f,Гц ' '      aD0.5col' ' aD0.5raw
' ' aDB_col ' ' aDB_raw '];
E1=[m fnom_Hnom_VperMidB fk_Hnom_VperMidB AbsDev_col_from0_5
AbsDev_raw_from0_5 AbsDev_col_Blim AbsDev_raw_Blim];
u2=['      №' '      aDH_col ' ' aDH_raw'];
E2=[m AbsDev_col_H AbsDev_raw_H];
disp('      Параметры для обеспечения субпиксельной
регистрации');
disp('      (в.10,с учетом поворота платформы
КА)');

```

```

disp('    нисходящий участок орбиты, поворот приемника ПРОТИВ
часовой стрелки');
disp('                                относительно направления движения
КА');
disp(u0);
disp(E0);
disp(u);
disp(E);
disp(u1);
disp(E1);
disp(u2);
disp(E2);
u3=['    Широта,гр ' ' УголПлатф,гр'];
E3=[B0_60_deg PlAng0_60_deg];
disp(u3);
disp(E3);
format long          %№56 возвращение формата вывода данных

```

ДОДАТОК Г

Результати розрахунку параметрів режиму субпіксельної реєстрації зображень для висоти орбіти 490 км та 668 км

>> microscan_err_scr_v9

Параметры для обеспечения субпиксельной регистрации

(в.9, с учетом поворота платформы КА)

нисходящий участок орбиты, поворот приемника по часовой стрелке

относительно направления движения КА

Проекц	Пикс, м	Фокус, мм	Апикс, мм	Нном, км	f_min, Гц	f_max, Гц	МаксШирота, гр
108.5993	112.8000	0.0250	490.0000	27.0000	63.0000	60.0000	

№	Угол0, гр	УголВращ, гр	УголУстМатр	УголДвиж	КоефСмещ	ПропускКадры
1.0000	0	0	0	0	0	0
2.0000	45.0000	47.9272	44.9970	47.9268	0.5000	0
3.0000	18.4349	21.3622	18.4319	21.3617	1.5000	0
4.0000	11.3099	14.2371	11.3069	14.2367	2.5000	1.0000
5.0000	8.1301	11.0573	8.1271	11.0569	3.5000	1.0000
6.0000	8.1301	11.0573	8.1271	11.0569	3.5000	2.0000
7.0000	6.3402	9.2674	6.3372	9.2669	4.5000	1.0000
8.0000	6.3402	9.2674	6.3372	9.2669	4.5000	2.0000
9.0000	6.3402	9.2674	6.3372	9.2669	4.5000	3.0000
10.0000	5.1944	8.1216	5.1914	8.1212	5.5000	2.0000
11.0000	5.1944	8.1216	5.1914	8.1212	5.5000	3.0000
12.0000	5.1944	8.1216	5.1914	8.1212	5.5000	4.0000
13.0000	4.3987	7.3259	4.3957	7.3255	6.5000	2.0000
14.0000	4.3987	7.3259	4.3957	7.3255	6.5000	3.0000
15.0000	4.3987	7.3259	4.3957	7.3255	6.5000	4.0000
16.0000	4.3987	7.3259	4.3957	7.3255	6.5000	5.0000
17.0000	3.8141	6.7413	3.8111	6.7408	7.5000	3.0000
18.0000	3.8141	6.7413	3.8111	6.7408	7.5000	4.0000
19.0000	3.8141	6.7413	3.8111	6.7408	7.5000	5.0000
20.0000	3.8141	6.7413	3.8111	6.7408	7.5000	6.0000
21.0000	3.3665	6.2937	3.3635	6.2932	8.5000	3.0000
22.0000	3.3665	6.2937	3.3635	6.2932	8.5000	4.0000
23.0000	3.3665	6.2937	3.3635	6.2932	8.5000	5.0000
24.0000	3.3665	6.2937	3.3635	6.2932	8.5000	6.0000
25.0000	3.3665	6.2937	3.3635	6.2932	8.5000	7.0000

№	f, Гц		aD0.5col	aD0.5raw	aDB_col	aDB_raw
1.0000	0	0	0	0	0	0
2.0000	0	0	0	0	0	0
3.0000	41.6491	42.0000	-0.0125	-0.0042	0.0075	-0.0191
4.0000	25.8297	52.0000	-0.0164	-0.0033	0.0082	-0.0321
5.0000	18.6260	37.0000	0.0238	0.0034	0.0089	-0.0457
6.0000	18.6260	56.0000	-0.0076	-0.0011	0.0089	-0.0453
7.0000	14.5445	29.0000	0.0138	0.0015	0.0096	-0.0587
8.0000	14.5445	44.0000	-0.0375	-0.0042	0.0095	-0.0580
9.0000	14.5445	58.0000	0.0138	0.0015	0.0096	-0.0587
10.0000	11.9241	36.0000	-0.0348	-0.0032	0.0101	-0.0711
11.0000	11.9241	48.0000	-0.0348	-0.0032	0.0101	-0.0711
12.0000	11.9241	60.0000	-0.0348	-0.0032	0.0101	-0.0711
13.0000	10.1014	30.0000	0.0659	0.0050	0.0110	-0.0855
14.0000	10.1014	40.0000	0.0659	0.0050	0.0110	-0.0855
15.0000	10.1014	51.0000	-0.0628	-0.0049	0.0108	-0.0838
16.0000	10.1014	61.0000	-0.0417	-0.0033	0.0108	-0.0841
17.0000	8.7609	35.0000	0.0094	0.0006	0.0116	-0.0978
18.0000	8.7609	44.0000	-0.0333	-0.0023	0.0115	-0.0972
19.0000	8.7609	53.0000	-0.0615	-0.0042	0.0115	-0.0969
20.0000	8.7609	61.0000	0.0402	0.0026	0.0116	-0.0982
21.0000	7.7340	31.0000	-0.0175	-0.0011	0.0122	-0.1105
22.0000	7.7340	39.0000	-0.0719	-0.0043	0.0121	-0.1098
23.0000	7.7340	46.0000	0.0747	0.0043	0.0123	-0.1117
24.0000	7.7340	54.0000	0.0218	0.0012	0.0122	-0.1110
25.0000	7.7340	62.0000	-0.0175	-0.0011	0.0122	-0.1105

№	aDH_col	aDH_raw
1.0000	0	0
2.0000	0	0
3.0000	-0.0644	-0.0218
4.0000	-0.1076	-0.0221
5.0000	-0.1527	-0.0226
6.0000	-0.1513	-0.0224
7.0000	-0.1956	-0.0227
8.0000	-0.1934	-0.0224
9.0000	-0.1956	-0.0227
10.0000	-0.2368	-0.0227
11.0000	-0.2368	-0.0227
12.0000	-0.2368	-0.0227
13.0000	-0.2845	-0.0233
14.0000	-0.2845	-0.0233
15.0000	-0.2790	-0.0228
16.0000	-0.2799	-0.0229
17.0000	-0.3254	-0.0233
18.0000	-0.3236	-0.0232
19.0000	-0.3224	-0.0231
20.0000	-0.3268	-0.0234
21.0000	-0.3676	-0.0234
22.0000	-0.3653	-0.0233
23.0000	-0.3716	-0.0237
24.0000	-0.3693	-0.0235
25.0000	-0.3676	-0.0234

Широта, гр	УголПлатф, гр
0	3.6805
20.0000	3.4540
40.0000	2.7997
60.0000	1.7849

```
>> microscan_err_scr_v9
```

Параметры для обеспечения субпиксельной регистрации

(в.9, с учетом поворота платформы КА)

нисходящий участок орбиты, поворот приемника по часовой стрелке

относительно направления движения КА

Проекц	Пикс, м	Фокус, мм	Апикс, мм	Нном, км	f_min, Гц	f_max, Гц	МаксШирота, гр
148.0496	112.8000	0.0250	668.0000	27.0000	63.0000	60.0000	

№	Угол0, гр	УголВращ, гр	УголУстМатр	УголДвиж	КоефСмещ	ПропускКадры
1.0000	0	0	0	0	0	0
2.0000	45.0000	48.0406	44.9966	48.0401	0.5000	0
3.0000	18.4349	21.4755	18.4316	21.4750	1.5000	0
4.0000	18.4349	21.4755	18.4316	21.4750	1.5000	1.0000
5.0000	11.3099	14.3505	11.3066	14.3500	2.5000	1.0000
6.0000	11.3099	14.3505	11.3066	14.3500	2.5000	2.0000
7.0000	8.1301	11.1707	8.1267	11.1702	3.5000	2.0000
8.0000	8.1301	11.1707	8.1267	11.1702	3.5000	3.0000
9.0000	6.3402	9.3808	6.3368	9.3803	4.5000	2.0000
10.0000	6.3402	9.3808	6.3368	9.3803	4.5000	3.0000
11.0000	6.3402	9.3808	6.3368	9.3803	4.5000	4.0000
12.0000	6.3402	9.3808	6.3368	9.3803	4.5000	5.0000
13.0000	5.1944	8.2350	5.1911	8.2345	5.5000	3.0000
14.0000	5.1944	8.2350	5.1911	8.2345	5.5000	4.0000
15.0000	5.1944	8.2350	5.1911	8.2345	5.5000	5.0000
16.0000	5.1944	8.2350	5.1911	8.2345	5.5000	6.0000
17.0000	4.3987	7.4393	4.3953	7.4388	6.5000	3.0000
18.0000	4.3987	7.4393	4.3953	7.4388	6.5000	4.0000
19.0000	4.3987	7.4393	4.3953	7.4388	6.5000	5.0000
20.0000	4.3987	7.4393	4.3953	7.4388	6.5000	6.0000
21.0000	4.3987	7.4393	4.3953	7.4388	6.5000	7.0000

№	f, Гц	aD0.5col	aD0.5raw	aDB_col	aDB_raw	
1.0000	0	0	0	0	0	
2.0000	0	0	0	0	0	
3.0000	29.4130	29.0000	0.0214	0.0071	0.0080	-0.0203
4.0000	29.4130	59.0000	-0.0044	-0.0015	0.0078	-0.0199
5.0000	18.2411	36.0000	0.0335	0.0067	0.0087	-0.0340
6.0000	18.2411	55.0000	-0.0126	-0.0025	0.0085	-0.0334
7.0000	13.1539	39.0000	0.0414	0.0059	0.0094	-0.0477
8.0000	13.1539	53.0000	-0.0254	-0.0037	0.0092	-0.0468
9.0000	10.2714	31.0000	-0.0270	-0.0030	0.0100	-0.0604
10.0000	10.2714	41.0000	0.0094	0.0010	0.0101	-0.0608
11.0000	10.2714	51.0000	0.0315	0.0035	0.0101	-0.0611
12.0000	10.2714	62.0000	-0.0270	-0.0030	0.0100	-0.0604
13.0000	8.4209	34.0000	-0.0512	-0.0047	0.0107	-0.0736
14.0000	8.4209	42.0000	0.0137	0.0012	0.0108	-0.0745
15.0000	8.4209	51.0000	-0.0512	-0.0047	0.0107	-0.0736
16.0000	8.4209	59.0000	-0.0050	-0.0005	0.0107	-0.0742
17.0000	7.1337	29.0000	-0.1043	-0.0081	0.0113	-0.0864
18.0000	7.1337	36.0000	-0.0599	-0.0047	0.0114	-0.0871
19.0000	7.1337	43.0000	-0.0299	-0.0024	0.0114	-0.0875
20.0000	7.1337	50.0000	-0.0084	-0.0007	0.0115	-0.0877
21.0000	7.1337	57.0000	0.0079	0.0006	0.0115	-0.0880


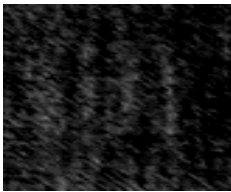
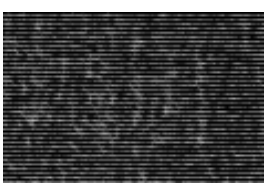


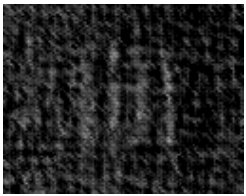
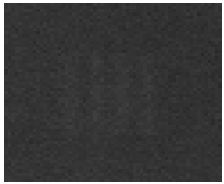
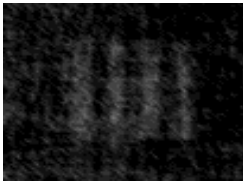
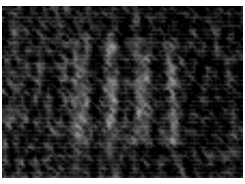
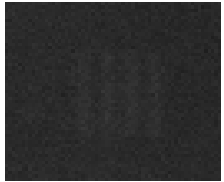
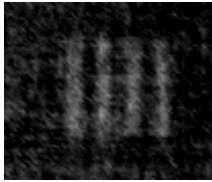
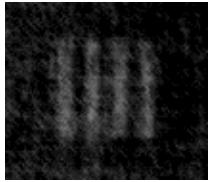
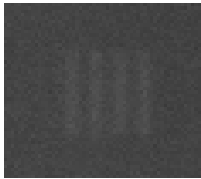
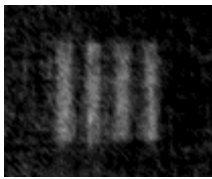
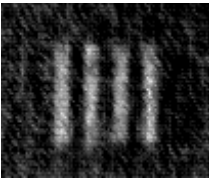
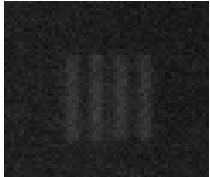
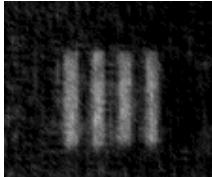
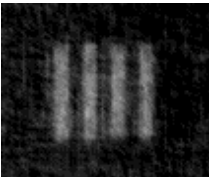
№	aDH_col	aDH_raw
1.0000	0	0
2.0000	0	0
3.0000	-0.0503	-0.0171
4.0000	-0.0495	-0.0168
5.0000	-0.0839	-0.0173
6.0000	-0.0823	-0.0170
7.0000	-0.1173	-0.0175
8.0000	-0.1151	-0.0172
9.0000	-0.1481	-0.0174
10.0000	-0.1493	-0.0176
11.0000	-0.1501	-0.0177
12.0000	-0.1481	-0.0174
13.0000	-0.1805	-0.0176
14.0000	-0.1826	-0.0178
15.0000	-0.1805	-0.0176
16.0000	-0.1820	-0.0177
17.0000	-0.2119	-0.0177
18.0000	-0.2133	-0.0178
19.0000	-0.2143	-0.0179
20.0000	-0.2150	-0.0180
21.0000	-0.2156	-0.0180

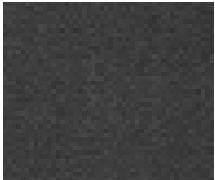

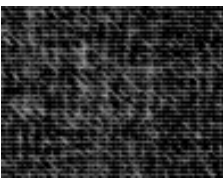
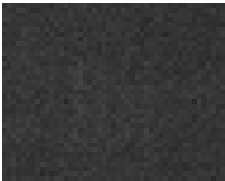
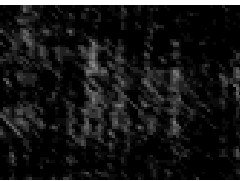

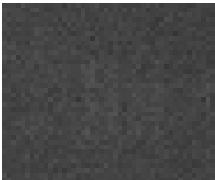

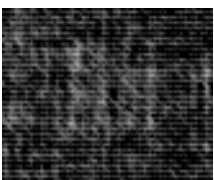
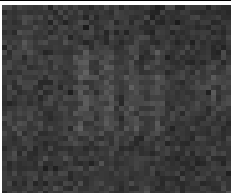
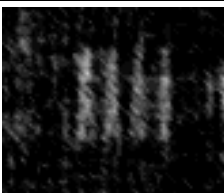


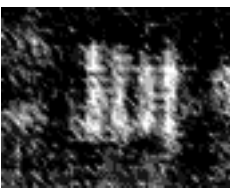
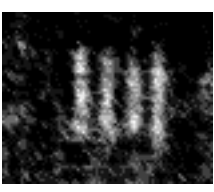

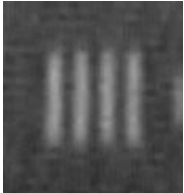
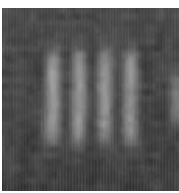
Широта, гр	УголПлатф, гр
0	3.8233
20.0000	3.5880
40.0000	2.9084
60.0000	1.8541


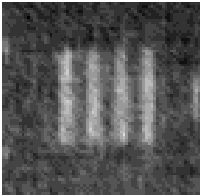
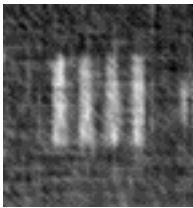

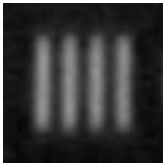
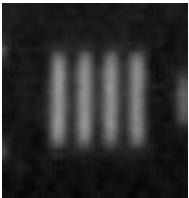
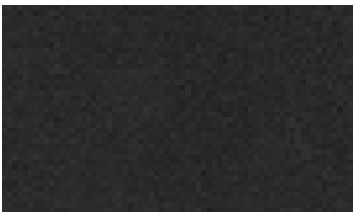

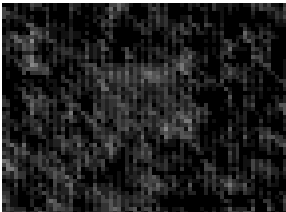

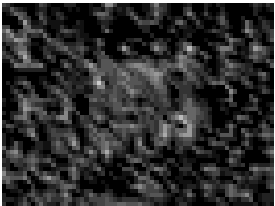
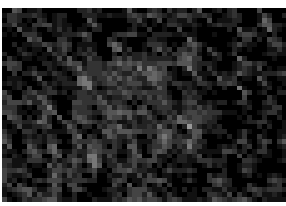
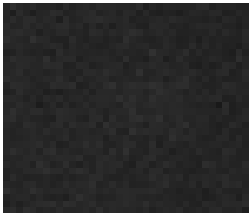
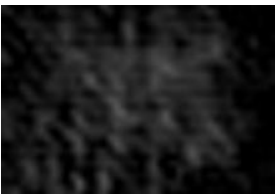
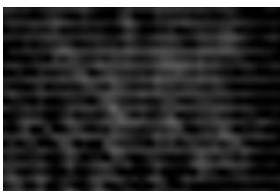

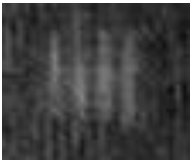
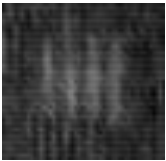
ДОДАТОК Д

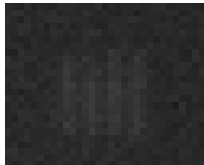

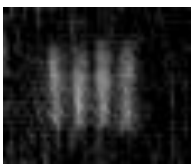


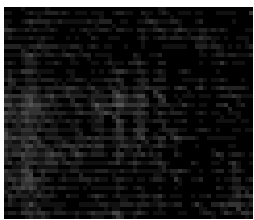
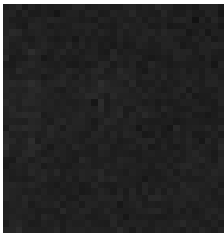
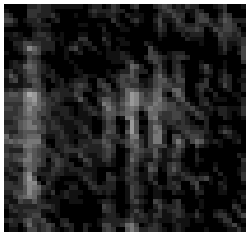
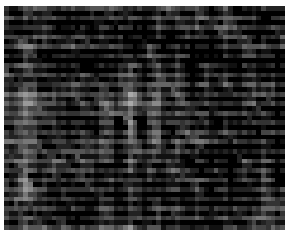
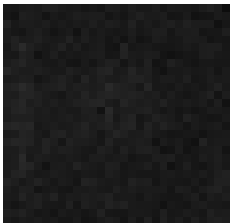
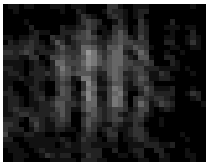
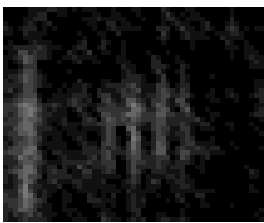

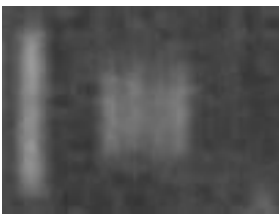
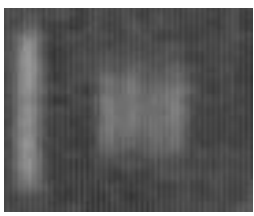
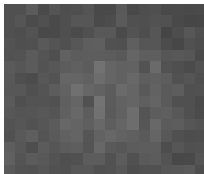
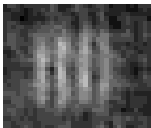
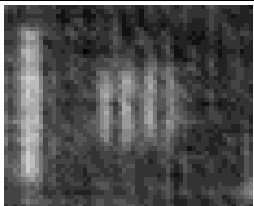
Таблиця Д.1

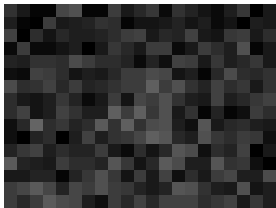


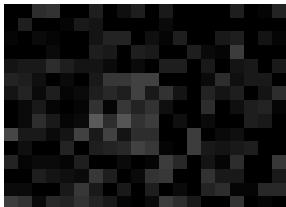


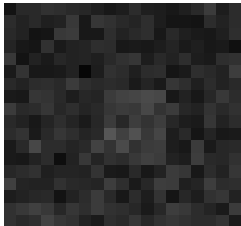


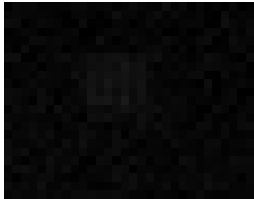

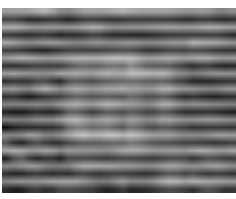




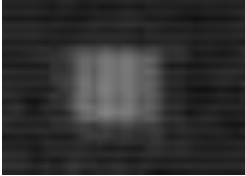
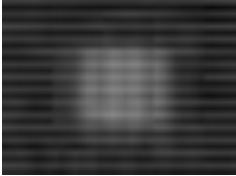
Результати вимірювань температурного контрасту та обробки зображень мір

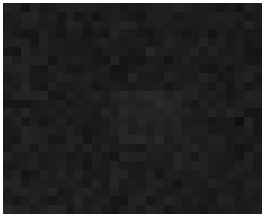
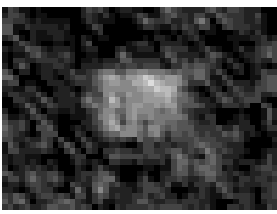
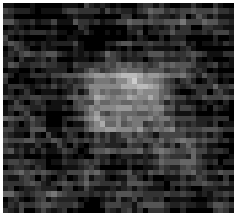
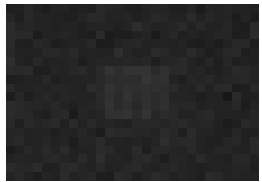
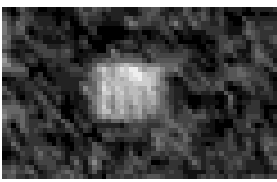
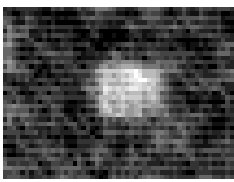
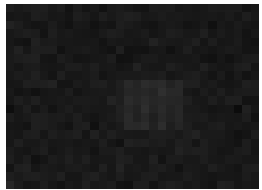
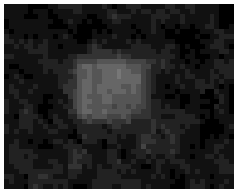
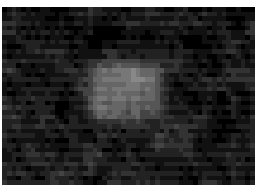

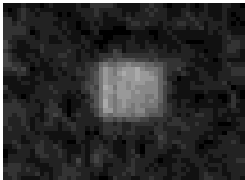
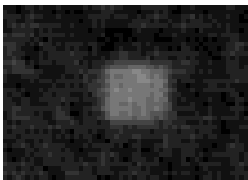

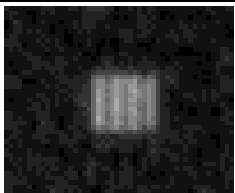
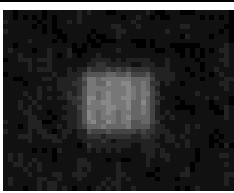
ΔT , °C	Вихідне зображення	Відновлене зображення	
		З використанням зміщення 12 мкм, (а)+(б)	З використанням зміщення 15 мкм, (а)+(в)
	СТ1 СДИК 1-33, $v_x=0,27v_N$		
$\Delta T=0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			

ΔT , °C	Вихідне зображення	Відновлене зображення	
		З використанням зміщення 12 мкм, (а)+(б)	З використанням зміщення 15 мкм, (а)+(в)
	ПР5-121-1-01, $v_x=0,4v_N$		
$\Delta T=0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			

ΔT , °C	Вихідне зображення	Відновлене зображення	
		З використанням зміщення 12 мкм, (а)+(б)	З використанням зміщення 15 мкм, (а)+(в)
$\Delta T=4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			
	СТ1 СДИК 1-05, $v_x = 0,55v_N$		
$\Delta T=0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			

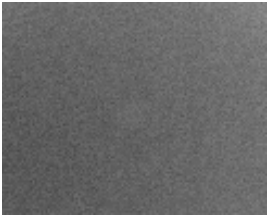
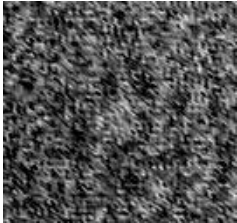
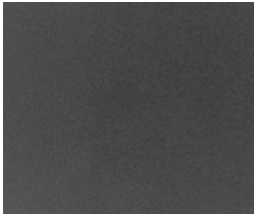

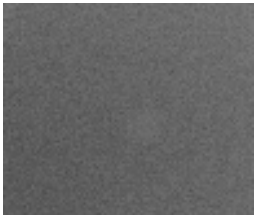

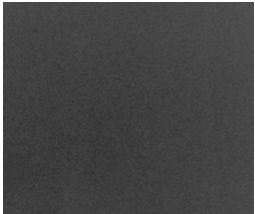

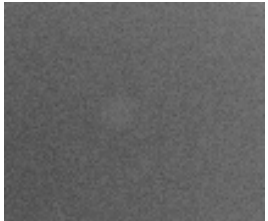
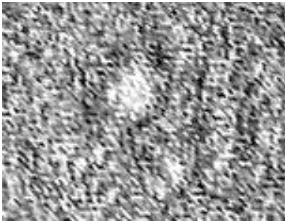
ΔT , °C	Вихідне зображення	Відновлене зображення	
		З використанням зміщення 12 мкм, (а)+(б)	З використанням зміщення 15 мкм, (а)+(в)
$\Delta T=3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			
ПР5-121-1-02, $v_x = 0,77v_N$			
$\Delta T=0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			


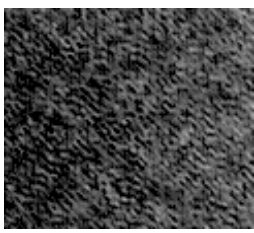
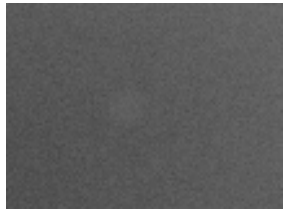
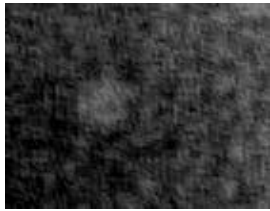
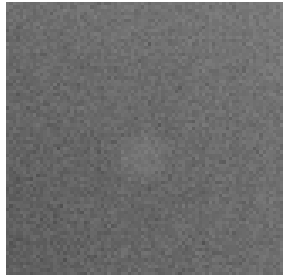
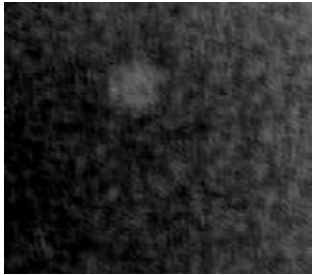
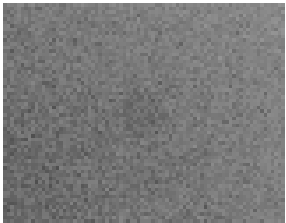
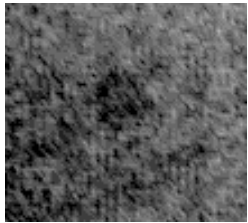
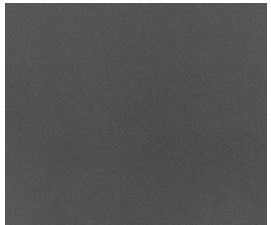
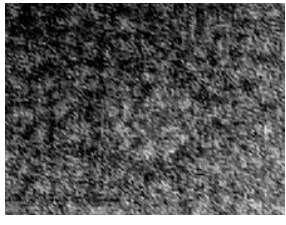
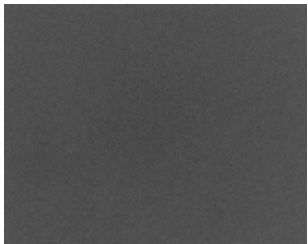
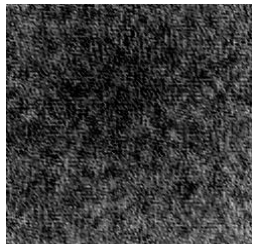
ΔT , °C	Вихідне зображення	Оброблене зображення кадрів (а)+(б)	Оброблене зображення кадрів (а)+(в)
	СТ1 СДИК 1-02, $v_x = 1,36v_N$		
$\Delta T = 1,5$ C°			
$\Delta T = 2,0$ C°			
$\Delta T = 2,5$ C°			
$\Delta T = 3,0$ C°			
$\Delta T = 5,0$ C°			
$\Delta T = 10,0$ C°			
	СТ1 СДИК 1-01, $v_x = 1,59v_N$		

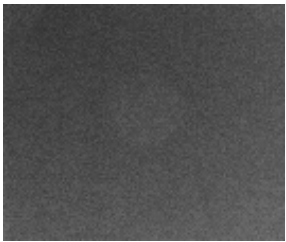
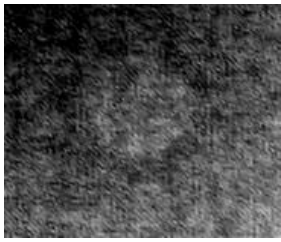
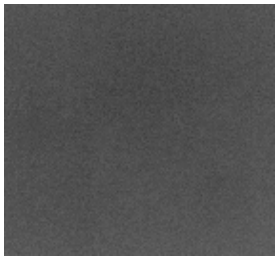
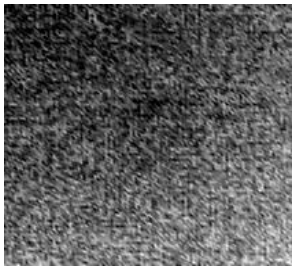
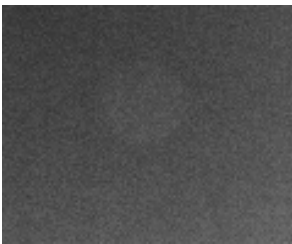

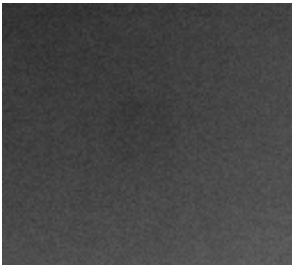
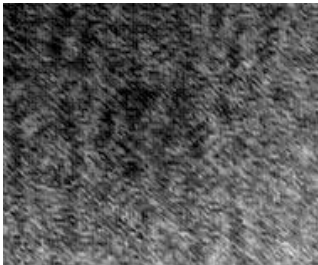

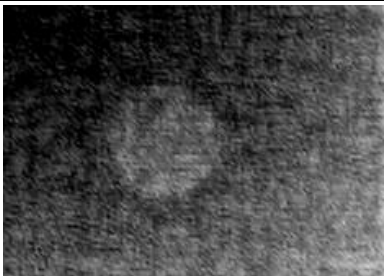

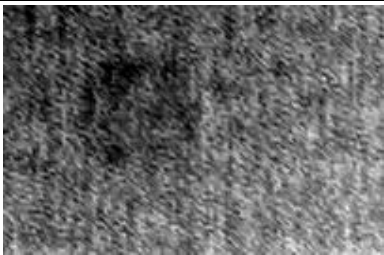
ΔT , °C	Вихідне зображення	Оброблене зображення кадрів (а)+(б)	Оброблене зображення кадрів (а)+(в)
$\Delta T=2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			
$\Delta T=10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$			

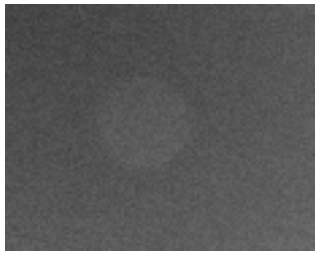
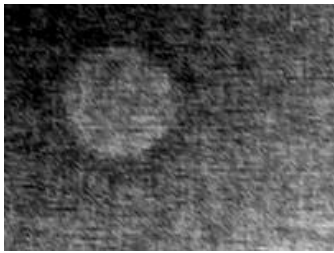
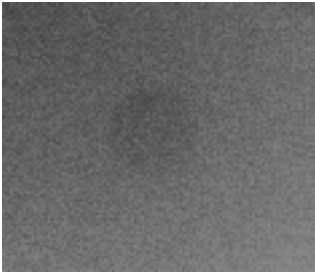
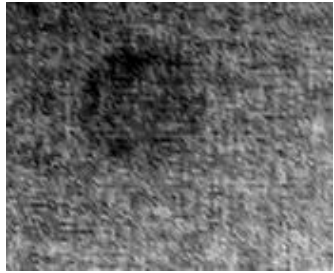
Таблиця Д.2

Результати вимірювань температурного контрасту та обробки зображень мір

ΔT , °C	Вихідне зображення	Відновлене зображення кадрів (а)+(б)
	СТ1 СДИК СБ 1-32, $v_x=0,073v_N$	
$\Delta T = +0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$		
$\Delta T = -0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$		
$\Delta T = +0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$		
$\Delta T = -0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$		
$\Delta T = +0,4 \text{ } ^\circ\text{C}$		

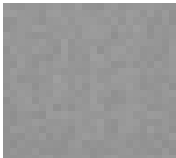



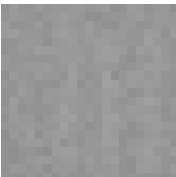







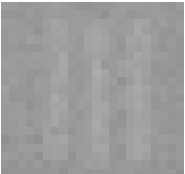

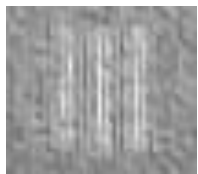

ΔT , °C	Вихідне зображення	Відновлене зображення кадрів (а)+(б)
$\Delta T = -0,4 \text{ } ^\circ\text{C}$		
$\Delta T = +0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$		
$\Delta T = +0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$		
$\Delta T = -0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$		
	СТ1 СДИК СБ 1-09, $v_x=0,029v_N$	
$\Delta T = +0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$		
$\Delta T = -0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$		


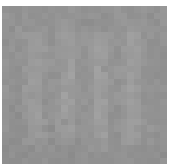



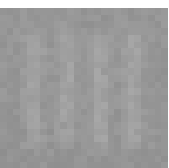
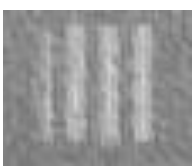


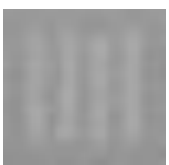














ΔT , °C	Вихідне зображення	Відновлене зображення кадрів (а)+(б)
$\Delta T = +0,3 \text{ C}^\circ$		
$\Delta T = -0,3 \text{ C}^\circ$		
$\Delta T = +0,4 \text{ C}^\circ$		
$\Delta T = -0,4 \text{ C}^\circ$		
$\Delta T = +0,5 \text{ C}^\circ$		
$\Delta T = -0,5 \text{ C}^\circ$		

























$\Delta T,$ $^{\circ}\text{C}$	Вихідне зображення	Відновлене зображення кадрів (а)+(б)
$\Delta T = +0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$		
$\Delta T = -0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$		

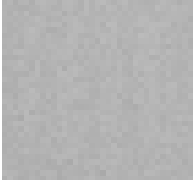



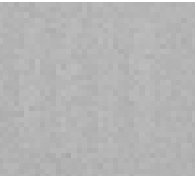
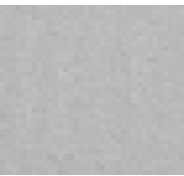

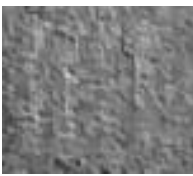
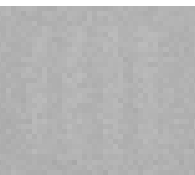







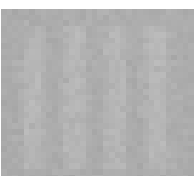
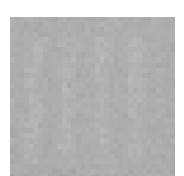


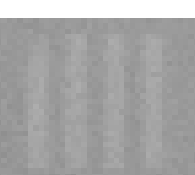
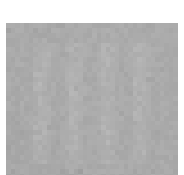


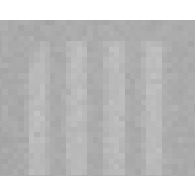
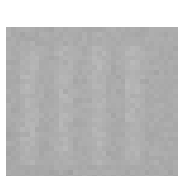
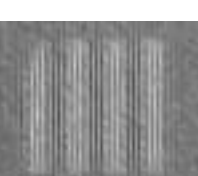

Таблиця Д.3


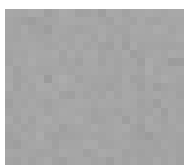





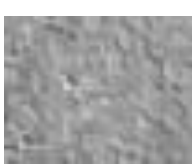
















Вихідні зображення та зображення мір підвищеної розрізненості в різних спектральних діапазонах

ΔT , °C	Вихідне зображення		Зображення підвищеної роздільної здатності	
	$\Delta\lambda = 8,0 - 13,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 10,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 13,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 10,5$ мкм
	ПР5-121-1-01, $v_x=0,4v_N$			
0,7				
1,0				
1,5				
2,0				

ΔT , °C	Вихідне зображення		Зображення підвищеної роздільної здатності	
	$\Delta\lambda = 8,0 - 13,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 10,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 13,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 10,5$ мкм
3,0				
4,0				
5,0				
6,0				
	ПР5-121-1-02, $v_x = 0,77v_N$			
0,7				
1,0				

ΔT , °C	Вихідне зображення		Зображення підвищеної роздільної здатності	
	$\Delta\lambda = 8,0 - 13,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 10,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 13,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 10,5$ мкм
1,5				
2,0				
3,0				
4,0				
5,0				
6,0				
	СТ1 СДИК 1-33 $v_x = 0,27v_N$			

ΔT , °C	Вихідне зображення		Зображення підвищеної роздільної здатності	
	$\Delta\lambda = 8,0 - 13,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 10,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 13,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 10,5$ мкм
0,6				
0,8				
1,0				
1,5				
2,0				
2,5				
3,0				

ΔT , °C	Вихідне зображення		Зображення підвищеної роздільної здатності	
	$\Delta\lambda = 8,0 - 13,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 10,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 13,5$ мкм	$\Delta\lambda = 8,0 - 10,5$ мкм
	СТ1 СДИК 1-05, $v_x = 0,55v_N$			
0,7				
1,0				
2,0				
3,0				
4,0				
6,0				

ДОДАТОК Е

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації

8. Kolobrodov V.G Calculation model for optoelectronic remote sensing system's radiometric resolution at arbitrary viewing angles / V. G. Kolobrodov, M. I. Lykholit, V. I. Mykytenko, V. M. Tiagur, K. V. Dobrovolska // Visnyk NTUU "KPI". Seria Radiotekhnika. Radioapparatobuduvannia. – 2017. – №69. – p. 30-34. (входить до наукометричної бази Web of Science)
9. Lyalko V.I. Prototype of satellite infrared spectroradiometer with superresolution / V.I. Lyalko, M.A. Popov, S.A. Stankevich S.A., S.V. Shklyar, V.N. Podorvan, N.I. Likholt, V.M. Tiagur, C.V. Dobrovolska // Journal of Information, Control and Management Systems. – 2014. – Vol.12. – No.2.– p. 153-164. (іноземне видання)
10. Колобродов В.Г. Застосування методів і алгоритмів цифрової обробки зображень в оптико-електронних приладах / В.Г. Колобродов, К.В. Харитоненко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – НТУУ «КПІ». – 2010. – Вип.40, с. 23-31.
11. Даниленко А.Н. Обобщенные характеристики инфракрасных систем поиска и слежения с матричными приемниками излучения / А.Н. Даниленко, В.Г. Колобродов, Е.В. Харитоненко // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2011. – №3, с.5-19.
12. Добровольська К.В. Математичне моделювання тепловізійного приладу спостереження з мікроболометричною матрицею / К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – НТУУ «КПІ». – 2014. – Вип.48(2), с. 28-38.
13. Колобродов В.Г. Методы повышения пространственного разрешения тепловизионных камер с матричными приемниками излучения /

В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко // Озброєння і військова техніка. – 2014. – №3. – с. 56-62.

14. Лялько В.И. Физическая модель инфракрасного спектрорадиометра с повышением пространственного разрешения при помощи субпиксельной обработки изображений / В.И. Лялько, М.А. Попов, С.А. Станкевич, С.В. Шкляр, В.Н. Подорван, Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Добровольская // Наука та інновації. – 2015. – 11(6). – с. 16-28.

<http://dx.doi.org/10.15407/scin11.06.016>, ISSN 1815-2066

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Харитоненко К.В. Цифрова обробка тепловізійного зображення з метою виявлення точкового об'єкта / К.В. Харитоненко // III науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» : збірник тез доповідей, 27 – 29 квітня 2010 р., м. Київ. – Київ, 2010. – с. 92.
6. Харитоненко К.В. Цифрова обробка тепловізійного зображення при дистанційному моніторингу землі / К.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов // XII Міжнародна науково-практична конференція «Людина і космос» : збірник тез, 7 - 9 квітня 2010 р. – Дніпропетровськ, 2010. – с. 525.
7. Харитоненко К.В. Цифрова обробка зображень з метою оцінювання швидкості руху об'єкта в тепловізійних приладах з матричними приймачами випромінювання / К.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов // IV науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» : збірник тез доповідей, 12 квітня 2011 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2011. – с. 84.
8. Колобродов В.Г. Субпиксельна обробка інфрачервоних космічних зображень з метою підвищення їх роздільної здатності / В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, К.В. Харитоненко // XI науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і

- перспективи” : збірник тез доповідей, 24-25 квітня 2012 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2012. – с.53-54.
9. Колобродов В.Г. Математична модель сканера дальнього інфрачервоного діапазону / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур, К.В. Харитоненко // V науково-практична конференція “Погляд у майбутнє приладобудування” : збірник тез доповідей, 24-25 квітня 2012 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2012. – с.78.
 10. Kharitonenko E.V. Image Resolution Enhancement in IR Device With Focal Plane Array / E.V. Kharitonenko, V.G. Kolobrodov, N.I. Lykholit, V.M. Tiagur // 13-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science : Scientific Works, 25-28 October 2012. – Kyiv, Ukraine. – p. 168.
 11. Лихолит Н.И. Методы компьютерного повышения разрешения инфракрасных изображений для решения задач дистанционного зондирования Земли / Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2013» Том 4, 21-23 травня 2013 р. – Київ, 2013. – с. 27.52-27.56.
 12. Лихолит Н.И. ИК-камера космического базирования с микроболометрической матрицей / Н.И. Лихолит, В.М. Тягур, Е.В. Харитоненко // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції “Авіа-2013”, Том 4, 21-23 травня 2013 р.– Київ, 2013. – с. 27.41-27.44.
 13. Харитоненко Е.В. Методы повышения пространственного разрешения тепловизионных камер с микроболометрическими приемниками излучения для дистанционного зондирования Земли / Е.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов // Материалы 6-ой Международной студенческой научно-технической конференции «Новые направления развития приборостроения». – Минск: БНТУ, 2013, с. 212.

14. Добровольська К.В. Експериментальні дослідження мінімальної роздільної різниці температур тепловізійної камери із субпіксельною обробкою зображень / К.В. Добровольська, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // XVI Міжнародна науково-практична конференція «Людина і космос» : збірник тез, 9 - 11 квітня 2014 р. – Дніпропетровськ, 2014.
15. Добровольська К.В. Реалізація субпіксельної реєстрації зображень для підвищення просторової роздільної здатності дистанційної зйомки / К.В. Добровольська, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур, М.О. Попов, С.А. Станкевич // XVI Міжнародна науково-практична конференція «Людина і космос» : збірник тез, 9 - 11 квітня 2014 р. – Дніпропетровськ, 2014.
16. Добровольская Е.В. Основные характеристики ИК камер для решения задач ДЗЗ / Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит, В.М. Тягур // XIII науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і перспективи” : збірник тез доповідей, 23-24 квітня 2014 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2014. – с. 47.
17. Добровольская Е.В. Оценка качества восстановленного изображения, полученного в результате субпиксельной обработки / Е.В. Добровольская // XIII науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і перспективи” : збірник тез доповідей, 23-24 квітня 2014 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2014. – с. 48.
18. Попов М.А. Повышение пространственного разрешения путём субпиксельной обработки изображений / М.А. Попов, С.А. Станкевич, В.М. Тягур, С.В. Шкляр, В.Н. Подорван, Е.В. Добровольская, Н.С. Лубский // Матеріали 8-ої міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми телекомунікацій-2014” (ПТ-2014). – Київ: ІТС НТУУ “КПІ”, 2014. – С.57-60.
19. Lyalko V.I. Subpixel processing of images from the frame infrared camera for future Ukrainian remote sensing satellite system / V.I. Lyalko, M.A. Popov, S.A. Stankevich, S.V. Shklyar, N.I Likholit, V.M. Tyagur,

- C.V. Dobrovolska // Proceedings of the Tenth International Conference on Digital Technologies (DT'2014). – Žilina: University of Žilina, 2014. – p. 232-235.
20. Popov M.A. Functional model of the new multiband infrared radiometer for “Sich” Earth observation satellite system / M.A. Popov, V.M. Tyagur, S.A. Stankevich, S.V. Shklyar, C.V. Dobrovolska // 14-та Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 8-12 вересня 2014 р. – Київ, 2014 – с.72.
21. Добровольська К.В. Математична модель тепловізійної камери космічного базування із субпіксельною реєстрацією зображень» / К.В. Добровольська, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // 14-та Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 8-12 вересня 2014 р. – Київ, 2014 – с.74.
22. Харитоненко К.В. Субпіксельна обробка інфрачервоних космічних зображень з метою підвищення їх роздільної здатності» / К.В. Харитоненко, В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека в цивільному захисті». – Київ, 2014.
23. Лялько В.І. Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра із субпіксельним підвищенням просторової розрізненості / В.І. Лялько, М.О. Попов, С.А. Станкевич, С.В. Шкляр, В.Н. Подорван, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур, К.В. Добровольська // Українська науково-технічна конференція «Авіакосмічне приладобудування» : тези доповідей, 10-11 грудня 2014 р. – Київ, 2014. – с. 33-35.
24. Добровольська К.В. Реалізація субпіксельної реєстрації зображень іч камери дзз та експериментальні дослідження підвищення просторової роздільної здатності / К.В. Добровольська, М.І. Лихоліт, В.М. Тягур, В.І. Лялько, М.О. Попов, С.А. Станкевич // Українська науково-технічна конференція «Авіакосмічне приладобудування» : тези доповідей, 10-11 грудня 2014 р. – Київ, 2014. – с. 47-50.

25. Добровольская Е.В. Исследование влияния параметров микроболометрических матриц на характеристики ИК камер космического базирования / Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов, В.М. Тягур // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» : збірник тез доповідей, 22-23 квітня 2015 р. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”. – 2015. – С. 69-70.
26. Stankevich S.A. Accuracy Improvement Of The Land Surface Physical Paramemers Estimation By Infrared Satellite Imaging / S.A. Stankevich, V.M. Tiagur, C.V. Dobrovolska, N.S. Lubsky // Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 24-28 серпня 2015 р. – Київ, 2015. – с. 212.
27. Добровольская Е.В. Модуляционная передаточная функция микроболометрической матрицы при использовании субпиксельной регистрации изображений / Е.В. Добровольская, В.Г. Колобродов, В.М. Тягур // Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 22-27 серпня 2016 р. – Київ, 2016. – с. 195.
28. Лялько В.И. Целостная технология получения изображений повышенного пространственного разрешения от перспективного спутникового инфракрасного спектрорадиометра / В.И. Лялько, Н.И. Лихолит, М.А. Попов, С.А. Станкевич, В.М. Тягур, К.В. Добровольская // Українська конференція з космічних досліджень : тези доповідей конференції, 22-27 серпня 2016 р. – Київ, 2016. – с. 225.

Наукова праця, яка додатково відображає наукові результати дисертації Пат. 109181 Україна МКВ G01C 3/08. Спосіб підвищення просторової розрізненості при дистанційній зйомці з використанням субпиксельної реєстрації зображень та пристрій для його здійснення / Лихоліт М.И., Лялько В.И., Попов М.О., Станкевич С.А., Тягур В.М., Харитоненко К.В. – Опубл. в Б.І., 2015, №14. – 15 с.

ДОДАТОК Ж**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор-Головний конструктор

КП СПБ «Арсенал»

_____ Лихоліт М.І.

“ _ ” _____ 2017 р.

Акт впровадження

Ми, що підписалися нижче, представники КП СПБ «Арсенал» заступник начальника науково-виробничого технологічного комплексу Тягур В.М., начальник відділу Оршак О.М., заступник начальника відділу Ворох А.М. склали цей акт про те, що розроблені в дисертаційній роботі заступника начальника відділу КП СПБ «Арсенал» Добровольської Катерини Володимирівни «Підвищення просторової роздільної здатності мікроболометричної камери для супутника» методика розрахунку основних характеристик мікроболометричної камери, алгоритм розрахунку параметрів різних режимів зйомки із застосуванням субпіксельної реєстрації зображень, програмне забезпечення для вибору параметрів зйомки супутниковою мікроболометричною камерою з субпіксельною реєстрацією зображень використані при проектуванні та створенні дослідного зразка сканера дальнього інфрачервоного діапазону (СДІЧ) для космічного апарату «Січ-2М».

_____ Добровольська К.В.

_____ Тягур В.М.

_____ Оршак О.М.

_____ Ворох А.М.